This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

B 474271

RAYNALD LEGOUËZ

EMPLOI DU BOUCLIER DANS LA CONSTRUCTION DES SOUTERRAINS

PARIS
BAUDRY & Cie EDITEURS

1837
ARTES VERITAS SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE
DEPARTMENT
OF
ENGINEERING

DE L'EMPLOI

DU BOUCLIER

DANS LA

CONSTRUCTION DES SOUTERRAINS

DE L'EMPLOI

DU BOUCLIER

DANS LA

CONSTRUCTION DES SOUTERRAINS

DE L'EMPLOI

72220

DU BOUCLIER

DANS LA

CONSTRUCTION DES SOUTERRAINS

PAR

RAYNALD LEGOUËZ
Ingénieur des Ponts et Chaussées,
Détaché au Service des Égouts de la Ville de Paris.

PARIS
LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE BAUDRY ET Cie, ÉDITEURS
15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15
MAISON A LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

1897
Tous droits réservés.

Recteur 12.2.71 x DUT

26 Jyos E.S.

INTRODUCTION

L'exécution des souterrains par la méthode dite du bouclier, à en juger par les remarquables travaux qu'elle a permis d'accomplir, et par l'avenir qui semble s'ouvrir devant elle, méritait d'être l'objet d'une étude spéciale. Peut-être aurait-il appartenu à de plus autorisés d'écrire sur la matière un ouvrage didactique? Sans aspirer à être cette œuvre magistrale, le présent livre est simplement le résultat des observations sur les chantiers, poursuivies pendant plusieurs années, des recherches et des réflexions d'un ingénieur qui a eu l'heureuse chance de prendre part personnellement à presque tous les travaux de ce genre exécutés en France et de pouvoir visiter les plus intéressants de ceux construits en Angleterre.

Le bouclier peut être défini une sorte de blindage ou de carapace métallique, à l'abri de laquelle s'exécutent les fouilles et le revêtement d'une galerie souterraine, et qui en outre se déplace progressivement suivant les besoins de l'avancement, en maintenant toujours les terres et en offrant une protection efficace pour les ouvriers et les ouvrages[1].

Le premier bouclier, pour l'exécution des souterrains sous

[1] Il remplace les anciens boisages coûteux compliqués, souvent impuissants, qui sont ordinairement employés pour exécuter les souterrains avec une énorme dépense de temps et d'argent.

les rivières, dans les couches de terrain aquifère et sans consistance, a été créé tout d'une pièce, par un trait de génie, par Isambert Brunel, ingénieur français émigré en Angleterre, dans le but de construire un tunnel sous la Tamise à Londres. Il y a dans cette œuvre une exubérance d'idées, une puissance de ressources vraiment extraordinaires; quand on la dégage des complications inhérentes à un premier essai, et de tous les artifices, cependant bien remarquables en soi, auxquels a dû avoir recours l'inventeur, pour suppléer à l'insuffisance des moyens que l'industrie mécanique et métallurgique du commencement du siècle mettait à sa disposition, on voit apparaître, sans qu'aucun presque soit omis, tous les principes essentiels du bouclier tel qu'on le construit aujourd'hui pour l'exécution des travaux difficiles dans les terrains pleins d'eau, sans consistance et sous les rivières les plus profondes et les plus rapides.

Les Anglais, avec leur esprit pratique, eurent tôt fait de renoncer aux complications de l'œuvre primitive de notre compatriote, pour n'en retenir que les traits essentiels. Peut-être à l'origine dépassèrent-ils le but, en créant un outil trop simple et tout juste suffisant pour les travaux relativement faciles auxquels ils l'appliquèrent. Peut-être est-ce pour avoir trop sacrifié à ce besoin de simplification et avoir laissé à tort de côté une partie importante de l'œuvre de Brunel, qu'ils se sont vus obligés, dans les terrains difficiles, de compléter le bouclier par des boisages, contrairement au principe même de l'engin, et de recourir sur le front d'attaque, c'est-à-dire là où l'abri puissant de la carapace métallique eût été le plus nécessaire, à de vieilles méthodes d'une sécurité douteuse. Quoi qu'il en soit, l'œuvre de Peter William Barlow et de Greathead a rendu d'immenses services, en rappelant l'attention sur la méthode, en mettant en évidence ses qualités

d'économie, de sécurité et de rapidité d'exécution et en donnant confiance dans les résultats à tous ceux qu'avaient effrayés les difficultés dont Brunel n'avait triomphé qu'avec tant de temps, de peine et de frais. On ne peut sérieusement leur tenir rigueur de ce que le bouclier, qu'ils avaient imaginé et appliqué, ait été trop longtemps conservé, avec de simples modifications de détails, sans sortir d'un moule en quelque sorte hiératique; de ce que l'on a eu la malencontreuse idée de l'appliquer tel quel dans des terrains tellement faciles et dans de telles conditions que l'on se demande à quoi sert de promener cette grosse masse de fer; ou de ce que l'on a commis l'erreur plus grave encore de l'utiliser dans des terrains et des circonstances où il était notoirement insuffisant, au risque d'aboutir à des désastres, comme celui de Melbourne.

Les Américains avaient commencé aussi à travailler dans cette voie, mais ils ne s'y attardèrent pas et affectèrent même de dédaigner le bouclier, jusqu'au jour où, à bout de ressources et fatigués d'échecs successifs, ils furent forcés de revenir à cette méthode qui, cette fois, mieux comprise, leur assura un succès retentissant. On vit en effet, coup sur coup, apparaître parallèlement en Angleterre et en Amérique, des innovations sérieuses pour approprier l'outil à l'exécution des travaux les plus difficiles. Greathead, sir Benjamin Baker, sir John Fowler, sir G.-F. Deacon, sir E.-W. Moir et bien d'autres apportèrent leur collaboration à cette transformation. Mais, on le verra, tous ces perfectionnements ne sont que la mise en œuvre, avec l'outillage moderne, air comprimé, machines hydrauliques, etc., d'idées déjà indiquées et même réalisées par Brunel et que l'on avait un peu hâtivement écartées dans la grande poussée de simplification du milieu du siècle en Angleterre.

Tel était l'état de la question quand M. Berlier eut le grand mérite d'introduire en France le bouclier anglais avec ses qualités et ses défauts, mais aussi avec le fétichisme d'outre-Manche, pour la forme circulaire et le revêtement métallique des souterrains. Ses travaux firent énormément de bruit et les ingénieurs les plus autorisés se plurent à reconnaître que l'outil était admirablement approprié au problème difficile du passage sous les rivières. Mais l'esprit français, s'il cède comme tout autre au besoin d'imitation, est au fond toujours enclin à l'indiscipline et avide de nouveauté. Aussi, après avoir consciencieusement admiré l'engin qui lui revenait d'Angleterre, il n'hésita pas à y apposer son cachet, en abandonnant hardiment la sujétion de la forme circulaire et en rejetant, comme conduisant à des dépenses excessives, l'enveloppe métallique, pour lui substituer la maçonnerie beaucoup plus économique dans nos régions. Il fut alors possible, grâce à la diminution du prix de revient, d'appliquer la méthode à des travaux qui n'auraient pu supporter les frais d'établissement du type anglais. C'est ainsi que MM. Chagnaud, Fougerolles et Augé créèrent en quelques années un type entièrement nouveau de bouclier permettant l'exécution des souterrains à des prix très modérés et certainement à moins de frais et avec plus de rapidité qu'avec les vieilles méthodes. Bien plus, ces prix sont tels que l'on peut désormais, avec économie ou tout au moins à prix égal, sans craindre aucun des accidents à la surface qui sont la conséquence ordinaire des travaux souterrains, substituer pour les galeries à fleur de sol la méthode du bouclier à celle de la tranchée couverte, chaque jour plus impossible dans les villes. On voit quel avenir, quel horizon nouveau cette hardie transformation ouvre tant pour les grands souterrains de chemins de fer que pour les voies métropolitaines. Peut-être y a-t-il

encore des points à critiquer dans la construction de ces boucliers; en tout cas le succès a prouvé que le principe en est bon, et on voudra bien accorder que deux boucliers seulement ont été construits sur ces bases et que le constructeur n'a pu d'un coup acquérir l'expérience amassée pendant de longues années par les ingénieurs anglais et américains.

Le but du présent livre est précisément de mettre en lumière les points essentiels, desquels on ne peut s'écarter sans s'exposer à de graves déboires, et les fautes qu'il n'est plus permis de commettre avec l'expérience du passé. Le nombre des travaux aujourd'hui exécutés est en effet assez considérable pour qu'il soit possible d'établir les règles principales de la construction des souterrains par la méthode du bouclier, éparses dans les documents les plus divers publiés tant en France qu'à l'étranger.

Il a semblé que le meilleur moyen de dégager ces règles, de manière que chacun pût en contrôler la réalité et la valeur, était de les déduire d'une sorte de monographie raisonnée de chacun des ouvrages les plus importants. Cette méthode a l'avantage de permettre à tout lecteur d'apprécier la vérité et la portée des conclusions et d'en tirer, sur les points qui l'intéresseraient plus particulièrement, de nouvelles qui auraient passé inaperçues ou auraient été négligées comme d'ordre secondaire. C'est dans ce but également que des dessins cotés aussi soigneusement et aussi complètement que possible ont été multipliés[1], et que l'on a joint aux dessins géométriques, véritables dictionnaires que l'on consulte mais que l'on ne lit pas, un grand nombre de vues perspectives qui donnent seules la sincère et fidèle image du travail et rensei-

[1] Contrairement à un usage général, dans les dessins d'ouvrages anglais, toutes les cotes ont été respectées en pieds et en pouces. On a eu pour but de donner les dimensions exactes et non une traduction plus ou moins approchée. Une table annexe permet de les traduire en mesures métriques.

gnent réellement l'homme de l'art sur l'organisation du chantier et la marche des travaux. Pour suivre les progrès de la méthode et bien juger de la valeur des corrections et modifications successives, indiquées ou condamnées par l'expérience, l'ordre chronologique s'imposait et il a été suivi.

Il ne restait plus qu'à condenser et à coordonner, sous forme d'observations ou de tableaux statistiques, les remarques faites au cours de ce voyage rapide à travers les chantiers. C'était la partie délicate du travail; car il peut sembler hardi d'émettre une critique sur l'œuvre d'hommes comme Brunel, Barlow, Greathead, pour ne parler que des morts les plus illustres, et on risquerait d'être taxé de présomption, si on n'appuyait chaque observation sur des faits incontestables. Quelque soin qu'il y ait été apporté, il est probable, pour ne pas dire certain, que les avis émis ne seront pas toujours partagés; en tout cas il est à espérer que l'on voudra bien en reconnaître la sincérité et l'impartialité, et la plus haute récompense que puisse espérer l'auteur, c'est l'abondance des critiques, qui lui serait la meilleure preuve que son œuvre n'a point été vaine.

DE L'EMPLOI
DU BOUCLIER
DANS LA
CONSTRUCTION DES SOUTERRAINS

CHAPITRE PREMIER

SOUTERRAIN SOUS LA TAMISE A LONDRES

(1825-1842)

Premières tentatives. — Les ingénieurs anglais se sont de tout temps préoccupés de créer des moyens de communication entre les deux rives de la Tamise, à l'aval du Pont de Londres. Dans cette partie de la rivière, les docks et les nécessités de la navigation rendent impossibles la construction de ponts fixes ou de bacs répondant aux besoins du trafic. Cette difficulté a forcément amené à étudier le percement de galeries souterraines sous le lit de la rivière. Un premier essai fut tenté en 1798 par un ingénieur nommé Dodd, entre Gravesend et Tilbury, mais le capital de l'entreprise se trouva épuisé avant même que ses promoteurs aient pu réussir à descendre un puits.

L'idée fut reprise par un mineur, nommé Vazie, que son habileté avait fait surnommer « la Taupe », et une compagnie se constitua en 1805 pour la construction d'un tunnel à Limehouse. Elle réussit, à grand'peine, à forer, à 300 pieds (91,44 m.) de la rivière, un puits de 13 pieds (3,96 m.) de diamètre et de 35 pieds (10,67 m.) de profondeur. L'argent étant venu à manquer, il fallut réduire le diamètre du puits à 10 pieds (3,05 m.) ; il fut descendu jusqu'à

68 pieds (20,73 m.) au-dessous du niveau des hautes eaux. A ce moment, l'ingénieur Trevithick fut adjoint au mineur Vazie. Avant d'attaquer le souterrain, il sembla prudent d'exécuter une petite galerie de recherche de 5 pieds (1,52 m.) de hauteur, 3 pieds (0,91 m.) de largeur à la base et 2 pieds 6 pouces (0,76 m.) de largeur au sommet. Cette galerie, commencée le 17 août 1807, atteignit, le 19 octobre de la même année, une longueur de 394 pieds (120,09 m.), sans grandes difficultés, dans un sable vert sec. A partir de ce moment, l'ingénieur Trevithick resta seul chargé du travail et le mineur Vazie, malgré son dévouement, fut congédié.

Le travail se continua rapidement jusqu'à 359 pieds (170,38 m.). A cette distance la galerie fut rejetée parallèlement à elle-même à 23 pieds (7,01 m.) plus à l'ouest, dans le but de reconnaître le terrain. L'avancement se poursuivit à raison de 11 pieds 3 pouces (3,43 m.) par jour jusqu'à environ 814 pieds (248,10 m.).A partir de ce point, la galerie sortit du sable et pénétra dans un banc de roche calcaire très dur ; pour éviter ce banc, la rampe très faible qui avait été primitivement donnée à la galerie, sur les 922 pieds (281,02 m.) déjà exécutés, uniquement pour assurer l'écoulement des eaux, fut augmentée et portée à 1/9 (0,11 m.) par mètre. L'ouvrage ne tarda pas à pénétrer au-dessus du rocher dans un banc de sable et d'argile avec coquillages qui donnait un peu d'eau. Le 22 décembre, le toit de la galerie était à 2 pieds (0,61 m.) au-dessus de la roche, quand il se produisit un premier éboulement qui entraîna une grande quantité d'eau et de terrrain détrempé. Au-dessus du toit s'était formée une excavation dans laquelle on voyait une couche de sable mouvant de 3 pieds (0,91 m.) d'épaisseur. Il fallut lutter contre d'énormes difficultés pour bourrer cette excavation et quoique la hauteur de la galerie eut été réduite, l'avancement ne put plus se faire qu'avec une extrême lenteur. Le 26 janvier 1808, un nouvel éboulement avec irruption d'eau se produisit. En un quart d'heure, le tunnel et le puits furent remplis et ce n'est qu'à grand'peine que l'ingénieur Trevithick et un ouvrier réussirent à s'échapper.

Des sondages en rivière indiquèrent qu'il s'était formé une cheminée de 4 pieds (1,22 m.) de diamètre qui mettait la galerie en communication avec le fond du lit. Après avoir rempli ce trou avec

des sacs d'argile et d'autres matériaux et mis la galerie à sec, on essaya de reprendre le travail. Mais les difficultés devinrent telles qu'il fallut bientôt y renoncer. Le toit de la galerie était cependant encore à 25 pieds (7,62 m.) au-dessous du fond du lit, épaisseur qui serait considérée aujourd'hui comme très forte et donnant de sérieuses garanties de sécurité. Mais il était évident qu'il fallait recourir à des procédés de nature à empêcher tout mouvement du terrain au-dessus de la galerie ; car, sous la pression de l'eau, ces mouvements deviennent bien vite d'une telle violence qu'il est impossible de les enrayer. La compagnie offrit en vain une prime de 300 livres sterlings (7 500 fr.) à qui lui apporterait un procédé d'exécution ; elle reçut 54 projets, mais pas un ne parut assez sûr pour qu'on osât même en faire l'essai.

Idées primitives de Brunel. — Ces échecs eurent comme conséquence de faire traiter de chimérique l'idée d'exécuter un souterrain sous la Tamise. L'invention du bouclier par Brunel put seul détruire ce préjugé et inspirer assez de confiance pour décider les capitalistes à constituer une nouvelle compagnie en 1823 et à reprendre une tentative, qui devait cette fois, quoique avec bien des vicissitudes, être couronnée de succès.

Marc-Isambert Brunel était un ingénieur français, né à Hacqueville (Eure) en 1769, et mort à Londres en 1849. Il servit un certain temps dans la marine française, émigra en 1793 aux Etats-Unis, où il séjourna pendant six ans. Revenu en 1799 en Angleterre, il s'y rendit célèbre par l'invention de plusieurs machines et attacha surtout son nom à la construction du premier souterrain sous la Tamise.

La première idée du bouclier lui fut suggérée en 1814, pendant qu'il exécutait un petit passage souterrain aux docks de Chatham, par l'examen du travail des tarets dans une vieille quille de navire, qui avait été sciée de long. Cette coupure mettait à nu les curieuses galeries creusées par ces animaux. Brunel remarqua que la tête de l'animal est munie d'une tarière avec laquelle il creuse la galerie, et que son corps sécrète sur son passage une matière qui forme immédiatement un revêtement imperméable à l'eau. Il conçut aussitôt un appareil qui contenait en germe tous les prin-

cipes des boucliers modernes et qui est reproduit dans les figures 1 à 4 d'après des dessins du temps.

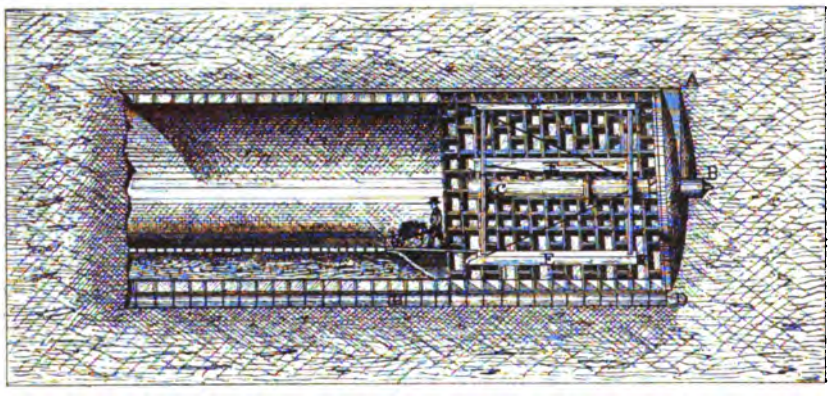


Fig. 1.

La partie avant AD correspond à la tête du taret, elle a la forme d'une tarière et tourne autour d'un axe creux, porté et maintenu en direction par un long bâti circulaire EE ; ce bâti s'avance avec la tête et représente le corps de l'animal. Quand la tête tourne, le

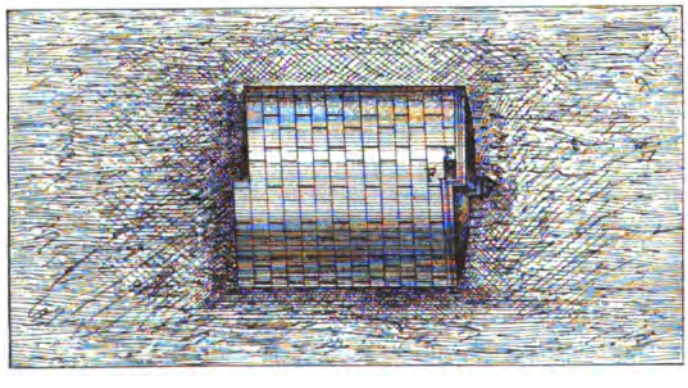


Fig. 2.

tranchant AB découpe le terrain, comme le montre la figure 3 et pénètre lentement dans le sol grâce à sa forme de vis.

Au fur et à mesure que l'appareil se déplace et dégage un petit espace entre lui et la fin du revêtement déjà posé, une nouvelle pièce de fonte FF est ajoutée à ce revêtement qui se poursuit ainsi

progressivement en hélice. En arrière, à l'intérieur du revêtement en fonte, peut au besoin être édifiée une chemise en maçonnerie de briques destinée à donner aux parois une résistance suffisante pour résister aux efforts auxquels elles sont soumises.

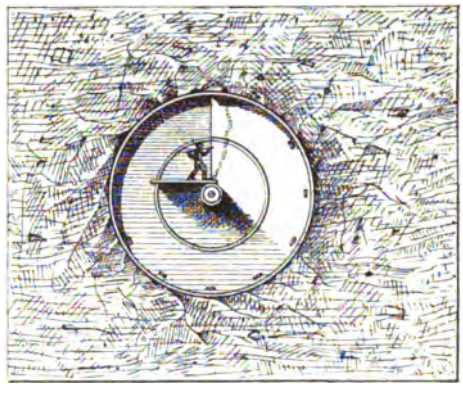


Fig. 3.

Brunel avait en outre prévu (fig. 4) de petits pieux GG, destinés à servir d'appui à l'enveloppe en fonte dans les terrains mous et un drain H pour l'écoulement des eaux. Le brevet pris par Brunel (n° 4202), en 1818, parle également d'un autre type de bouclier, composé d'un certain nombre de cellules avec des rouleaux de friction entre elles, qui pouvaient être avancées indépendamment les unes des autres, par un moyen mécanique et de préférence à l'aide de presses hydrauliques.

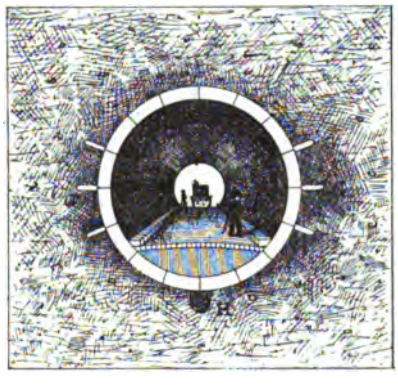


Fig. 4.

On peut dire que dès cette époque Brunel, avec un génie admirable, avait fixé les traits essentiels du bouclier moderne, avec la paroi latérale de protection, la cloison de face, la division en cellules, les presses hydrauliques et le revêtement en fonte. Il y ajouta plus tard les plaques métalliques minces, à l'abri desquelles est faite la construction définitive et qui constituent ce qui fut appelé la queue du bouclier. Malheureusement il n'appliqua pas intégralement son idée ou du moins en compliqua singulièrement l'exécution. A quoi faut-il l'attribuer ? Si l'on en croit l'auteur anglais bien connu Law, Brunel aurait adopté, pour le tunnel sous la Tamise, une forme rectangulaire, parce que le terrain se

composait de couches horizontales de densités différentes et exerçant par suite une pression verticale, variable d'ailleurs suivant la densité des couches ; la forme rectangulaire lui aurait paru mieux appropriée pour y résister et plus facile à construire. Ce serait bien rabaisser Brunel que de penser qu'il ait pu faire un raisonnement aussi faux et ne tenir aucun compte des pressions latérales, des sous-pressions et des efforts en tous sens produits par un terrain semi-fluide. Ne serait-ce pas plutôt que l'état de l'industrie mécanique et métallurgique à cette époque ne lui permettait pas de réaliser son invention, d'obtenir entre autres choses les pièces de fonte du revêtement, les presses pour mouvoir le bouclier d'une seule pièce ? C'est l'opinion de très bons esprits en Angleterre, et elle paraîtra juste pour tous ceux qui savent apprécier la haute valeur de Brunel.

Le souterrain. — La figure 5 représente le type définitivement adopté pour le souterrain sous la Tamise, avec la coupe de la maçonnerie de briques dont il se compose et des diverses couches de terrain. Cette coupe est prise vers le milieu du souterrain, à son point bas, dans la partie la plus profonde de la rivière.

L'ouverture de chacune des deux travées est de 14 pieds (4,27 m.). Les piédroits sont dressés suivant des arcs de cercle de 31 pieds 6 pouces (9,60 m.) de rayon pour les flancs et de 58 pieds (17,68 m.) pour la pile centrale ; les centres de ces quatre arcs de cercle se trouvent sur la ligne des naissances. Les radiers sont formés d'arcs de cercle de 17 pieds (5,18 m.) de rayon, dont les centres se trouvent à l'intrados des arches. L'épaisseur de la maçonnerie de briques dans la voûte est de 2 pieds 6 pouces (0,76 m.). Elle est la même au radier qui repose en outre sur des planches de bois d'orme. Les piédroits ont 3 pieds (0,91 m.) d'épaisseur et la pile centrale 3 pieds 6 pouces (1,07 m.). La même coupe montre que les voûtes se composent de rouleaux sans liaison d'une brique ou d'une demi-brique d'épaisseur. Le rouleau d'intrados a été généralement maçonné avec du ciment pur et le reste de la maçonnerie avec un mortier composé de parties égales de sable et de ciment.

D'après M. Wilde, qui a pu voir les travaux, étant tout jeune, ce serait après coup que l'on aurait élevé la cloison séparative et plus tard encore que l'on aurait percé les arches de communi-

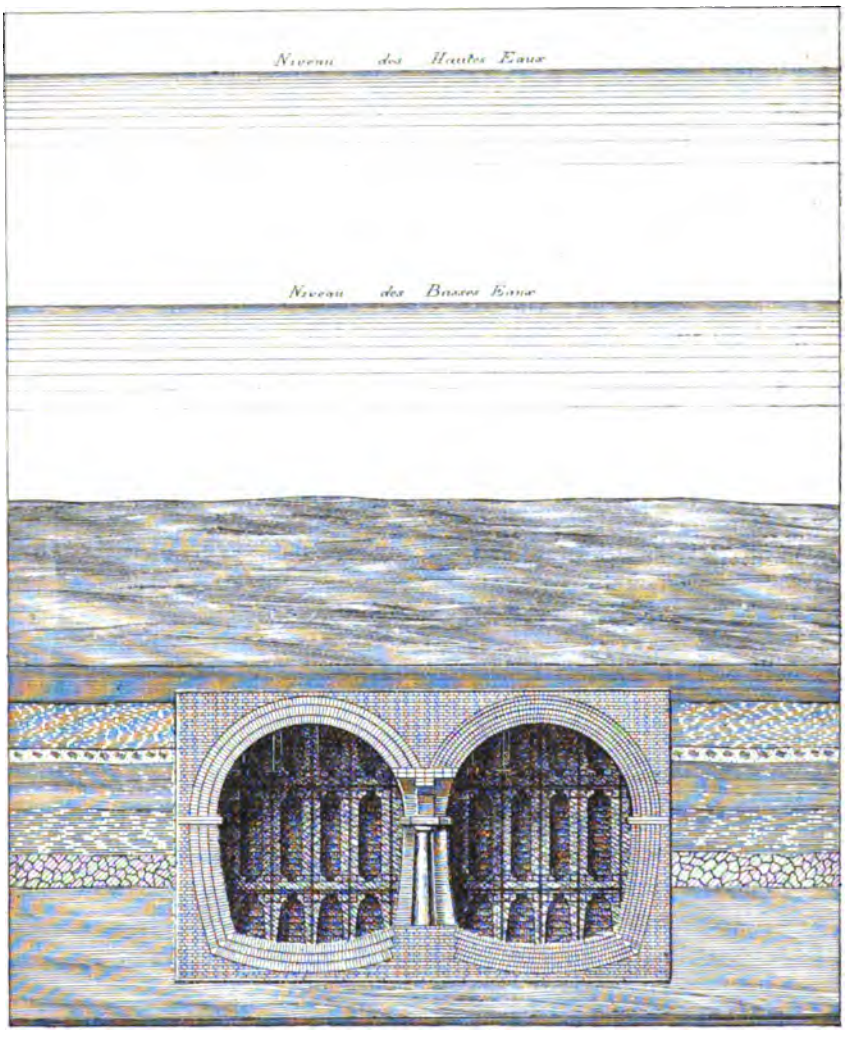


Fig. 5. — Coupe du souterrain.

cation, qui existent tous les 18 pieds (5,59 m.). Quoiqu'il soit difficile de contredire un témoin oculaire, cette affirmation ne cadre pas avec les rapports par lesquels Brunel rend compte de

l'avancement des travaux et où il est question presque dès le début des travées est et ouest.

Enfin, d'après le même M. Wilde, pour assécher le tunnel et se garantir des suintements à travers la maçonnerie, on aurait placé sur les flancs et à la voûte des tuiles de toitures espacées d'un peu moins d'une largeur de tuile ; les espaces laissées libres auraient été recouverts d'une seconde rangée de tuiles et le tout enveloppé d'un enduit de ciment. Ce travail aurait eu pour objet de créer une série de canaux par où l'eau pouvait s'écouler dans le drain général et aurait rendu les parois du souterrain complètement sèches.

Commencement des travaux. — Une compagnie s'était formée dès 1823 pour appliquer les idées de Brunel. La première partie de l'année 1824 fut employée à étudier le terrain et en juillet les directeurs écrivaient : « Le résultat des 39 sondages, « faits dans la rivière sur deux lignes parallèles à l'axe du souter- « rain, ont révélé la présence d'une couche d'argile bleue d'épais- « seur suffisante pour assurer la sécurité de l'ouvrage. Un « sondage sur la rive droite, et un puits paroissial, sur la rive « gauche, ont donné les mêmes résultats encourageants. » C'est ce rapport qui décida Brunel à adopter les dimensions indiquées ci-dessus au lieu de celles beaucoup plus faibles de 34 pieds (10,36 m.) sur 18 (5,48 m.) auxquelles il s'était arrêté à l'origine. L'acte du Parlement, autorisant les travaux, reçut la sanction royale, vers la même époque en juin 1824.

Fonçage des puits (fig. 6, 7 et 8). — La compagnie se mit aussitôt en mesure de commencer les travaux et, le 16 février 1825, Brunel attaqua le puits de Rotherhithe par des procédés nouveaux qui firent sensation. Il fit battre en cercle une série de petits pieux, destinés à supporter les maçonneries du puits pendant leur construction. Ces dernières reposaient sur un rouet, mi-partie fer, mi-partie bois. A la partie inférieure se trouvait un cercle en fer fondu de 50 pieds (15,24 m.) de diamètre, 3 pieds (0,91 m.) de hauteur, et 10 pouces (0,25 m.) de largeur au sommet, tandis que sa partie inférieure était taillée en biseau à 45°, de manière à péné-

trer dans le terrain. Ce cercle métallique était formé de 48 segments solidement boulonnés entre eux à l'aide de nervures venues de fonte avec lui. Il était surmonté de deux anneaux en bois, formés chacun de 16 segments, réunis à l'anneau de fer par 9 vis. Ces deux rangs de pièces de bois avaient une épaisseur totale de 12 pouces (0,30 m.) et les joints dans chaque rang ne se correspondaient pas. Les anneaux de bois étaient placés à l'aplomb de l'anneau en fer à l'extérieur, mais débordaient à l'intérieur de manière à offrir à la maçonnerie une assise de 3 pieds 4 pouces (1,02 m.) de largeur. En outre, dans la seconde couche de bois, un canal circulaire de 12 pouces (0,30 m.) de largeur et 2 pouces (0,05 m.) de profondeur avait été ménagé pour assurer une meilleure liaison avec la maçonnerie.

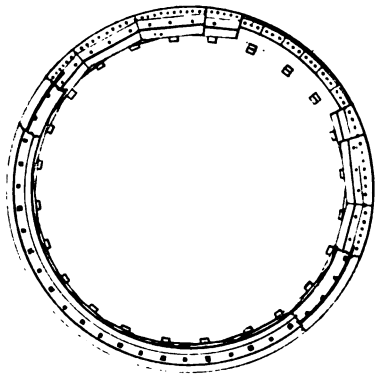


Fig. 6. — Plan de la trousse.

La première brique fut posée solennellement le 2 mars et pendant la cérémonie on cacheta douze bouteilles de vin, qui ne

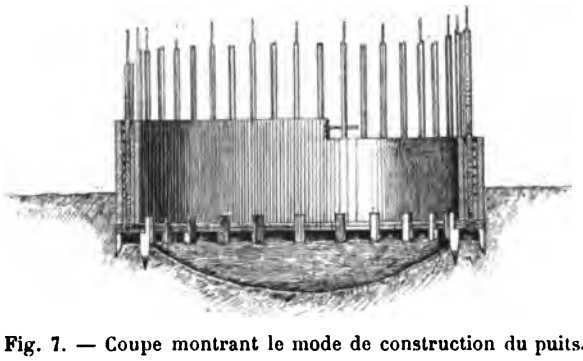


Fig. 7. — Coupe montrant le mode de construction du puits.

devaient être débouchées que dix-sept ans plus tard, après l'achèvement du travail. La maçonnerie de briques, exécutée avec du mortier de ciment romain, avait 3 pieds (0,91 m.) d'épaisseur. Un cercle en bois carré de 3 pouces de côté (0,076 m.) fut intercalé toutes les 4 rangées, à partir de la douzième. En outre, 24 tirants

en fer carré de 1 pouce 1/2 (0,03 m.) enveloppés de bois, alternant avec 24 autres tirants en bois carrés de 4 pouces (0,10 m.), fixés à leurs extrémités par des boulons en fer assurèrent, dans le sens vertical, une liaison parfaite de la maçonnerie.

Avant de commencer cette maçonnerie, le rouet fut descendu. Dans ce but, après l'avoir calé sur des coins, des ouvriers retirèrent les pieux provisoires, puis en desserrant les coins, abaissèrent progressivement le rouet jusqu'à ce qu'il vînt reposer sur une nouvelle rangée de pieux battus à un niveau inférieur ; l'opération fut répétée plusieurs fois jusqu'à ce que le rouet fût arrivé à la profondeur de 6 pieds 4 pouces (1,93 m.) ; il avait été nécessaire pour assurer la descente, à partir de la profondeur de 4 pieds 10 pouces (1,47 m.), de charger le rouet d'un mur provisoire en briques à sec, pesant 250 tonnes (254 000 kg.). La maçonnerie excessivement soignée fut alors exécutée avec un mortier composé de 3 parties de ciment romain pour 1 de sable. Elle était montée en trois anneaux concentriques de 1 pied ; l'anneau intermédiaire, correspondant au canal ménagé dans le rouet, était toujours tenu en contre-bas des deux autres et se posait à plein bain de mortier. La paroi extérieure du puits était en outre revêtue d'un enduit de 2 pouces (0,05 m.) d'épaisseur en mortier composé moitié ciment, moitié sable, qui avait pour double but d'assurer l'étanchéité et d'offrir une surface lisse facilitant la descente. Le puits fut monté de cette manière sur 40 pieds (12,19 m.) de hauteur ; les tiges de bois et les tirants en fer furent alors fixés, au moyen de boulons, dans un anneau de bois semblable à celui du bas, placé sur le sommet. La maçonnerie ainsi exécutée cubait 17 700 pieds (499,39 m.^{3}) et pesait plus de 900 tonnes (914 443 kg.). Au sommet du puits enfin fut disposé un plancher sur lequel reposait la machinerie, ainsi qu'une chaîne à godets destinée à monter les déblais.

A la profondeur de 15 pieds (4,57 m.) qui avait été atteinte sans difficulté à travers le gravier donnant un peu d'eau, la descente se ralentit ; pour l'accélérer, l'épuisement fut arrêté de manière à laisser le puits se remplir et de l'eau fut coulée le long de sa paroi extérieure pour ramollir le sol. Cet artifice entraîna, comme on le désirait, une descente de 10 pouces (0,25 m.) en deux heures ;

mais quand le puits eut été mis à sec, on s'aperçut qu'un des segments en fer était cassé et un autre faussé. Après la réparation, la descente reprit régulièrement. Cependant, le 19 avril, il se produisit une descente brusque de 8 pouces (0,20 m.). Les assistants, effrayés par le bruit semblable à celui de la foudre, crurent que la construction allait s'écrouler ou tout au moins que les machines tomberaient du plancher dans le puits ; mais quand ils furent remis de leur émoi, ils eurent la satisfaction de constater qu'il n'y avait ni dislocation, ni avarie d'aucune sorte. Cette secousse était due à ce que le rouet avait franchi le gravier et pénétré brusquement dans une couche de sable meuble.

Il fallut bientôt installer une machine à vapeur provisoire de 20 chevaux pour l'épuisement de l'eau dont l'abondance était considérable ; il fut même nécessaire le 10 mai, à la traversée d'une couche de sable mouvant, d'y adjoindre des pompes à bras. Malgré ces difficultés, le 18 mai, après être descendu de 40 pouces (1,02 m.) en deux jours le rouet arrivait à une petite couche de gravier d'environ 15 pouces (0,38 m.) sous laquelle se trouvait l'argile imperméable. Quand il eut atteint l'argile, la descente s'arrêta. Ce ne fut qu'après bien des pertes de temps et en employant toutes sortes d'artifices que, les venues d'eau qui se faisaient jour en délayant l'argile, sous l'arête du cuvelage, purent être étanchées. Brunel résolut alors d'achever le puits qui avait atteint une profondeur de 37 pieds (11,28 m.) par reprise en sous-œuvre.

La première reprise fut faite en maçonnerie de briques sur une hauteur de 8 pieds 6 pouces (2,59 m.) et avec une épaisseur de 4 pieds (1,22 m.) à 4 pieds 1/2 (1,37 m.). La paroi intérieure était descendue à l'aplomb du puits. L'anneau de fer fut d'ailleurs abandonné, dans la crainte de voir se reproduire et s'aggraver les irruptions de sable et d'eau qui avaient causé tant de peine à aveugler, et bloqué dans la maçonnerie de briques dont les trois derniers rangs furent clavés avec du ciment pur. Le second anneau de reprise en sous-œuvre fut fondé 8 pieds 3 pouces (2,51 m.) plus bas ; le terrain se composait d'une argile coquillière tournant à la formation rocheuse, surmontant un terrain dur formé de couches de gravier, de sable vert, de calcaire et de terre ocreuse. Les fondations de la troisième et dernière reprise furent descendues

d'un coup à 12 pieds (3,66 m.) plus bas, soit à 65 pieds 6 pouces (19,97 m.) au-dessous des hautes eaux. Ce dernier anneau fut assis sur des petits pieux de 2 pieds 6 pouces (0,76 m.) de longueur et exécuté en maçonnerie de moellons et de mortier composé de

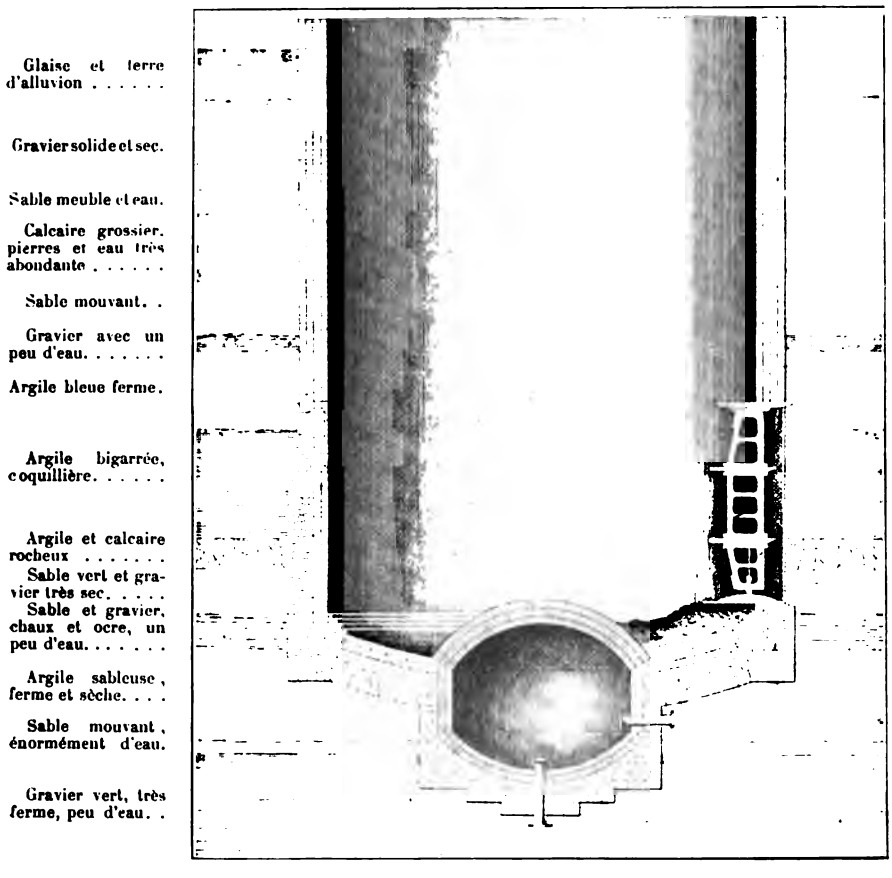


Fig. 8. — Coupe du puits.

1 partie de ciment, 2 de chaux et 3 de sable. Le parement seul fut monté avec deux rangs de briques au mortier de ciment.

Il restait à exécuter le puisard destiné à recevoir les eaux de la galerie de drainage, qui devait être faite sous le souterrain. Les sondages indiquèrent à 72 pieds (21,94 m.) un banc de sable mouvant de 1 pied (0,30 m.) d'épaisseur et à 85 pieds (25,91 m.) la couche profonde de sable mouvant. Brunel employa pour le fon-

çage de ce puisard un second puits analogue au premier, de 25 pieds (7,62 m.) de diamètre. Il réussit avec beaucoup de peine à traverser la première couche de sable mouvant et à descendre le puits à 77 pieds (23,46 m.) où il le fonda sur un radier en forme de voûte renversée. Dans ce puisard aboutissaient un tuyau de fond, qui avait servi pendant la construction et un tuyau latéral destiné à recevoir les eaux du drainage. La construction de la voûte du puisard et son raccordement par un radier avec les parois du grand puits furent des opérations relativement faciles.

A la fin d'octobre, tout était terminé et le bouclier monté à l'entrée du souterrain après 8 mois de travail. Le puits de rive gauche, côté Waping, fut descendu plus tard, grâce à l'expérience acquise, d'un trait, beaucoup plus vite et à très peu de frais, à 80 pieds (24,38 m.).

Le bouclier. — Il y eut en réalité deux boucliers. Le premier servit jusqu'à l'accident de 1828. A la reprise du travail, en raison de son état de dislocation, il fut remplacé par un autre beaucoup plus perfectionné, qui sera décrit le premier. Le bouclier devait à la fois supporter la charge de terre et d'eau, variable avec la marée jusqu'à l'achèvement de la maçonnerie et pouvoir s'avancer facilement.

Il se composait de 12 parties distinctes dont six supportaient toute la charge, pendant que les six autres étaient poussées en avant. Law les compare à des hommes, avec des jambes articulées qui leur permettaient de se porter et d'avancer, des bras grâce auxquels ils soutenaient leurs voisins, et des têtes qu'ils pouvaient redresser et tourner, tout en portant la charge du toit.

Le bouclier avait les dimensions extérieures du souterrain, soit 22 pieds 3 pouces (6, 88 m.) de hauteur et 37 pièces 6 pouces (11, 43 m.) de largeur. Il faisait saillie à environ 9 pieds (2, 74 m.) en avant de la maçonnerie. Chaque cadre de 3 pieds (0, 91 m.) de largeur, était divisé par 3 planchers horizontaux en fer en 3 cellules, ce qui donnait en totalité 36 cellules. Le front d'attaque, qui était maintenu par 500 planches métalliques, avait une surface de plus de 800 pieds carrés (74 m²); chaque cellule pouvait être fermée de manière à isoler les parties dangereuses. Le bouclier devait en

outre supporter une pression verticale au toit sur une surface

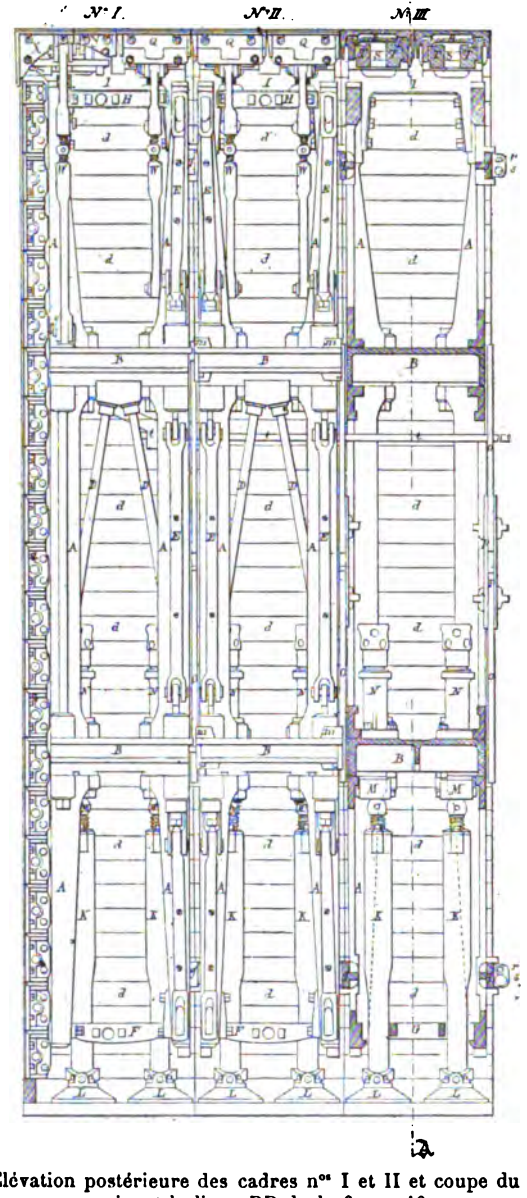


Fig. 9. — Elévation postérieure des cadres n^{os} I et II et coupe du cadre n° III suivant la ligne BB de la figure 10.

d'environ 400 pieds carrés (37 m²) et des poussées latérales sur les cadres extrêmes sur une surface de 440 pieds carrés (41 m²)

sur toute cette surface, tant en haut que sur les côtés, d'étroites

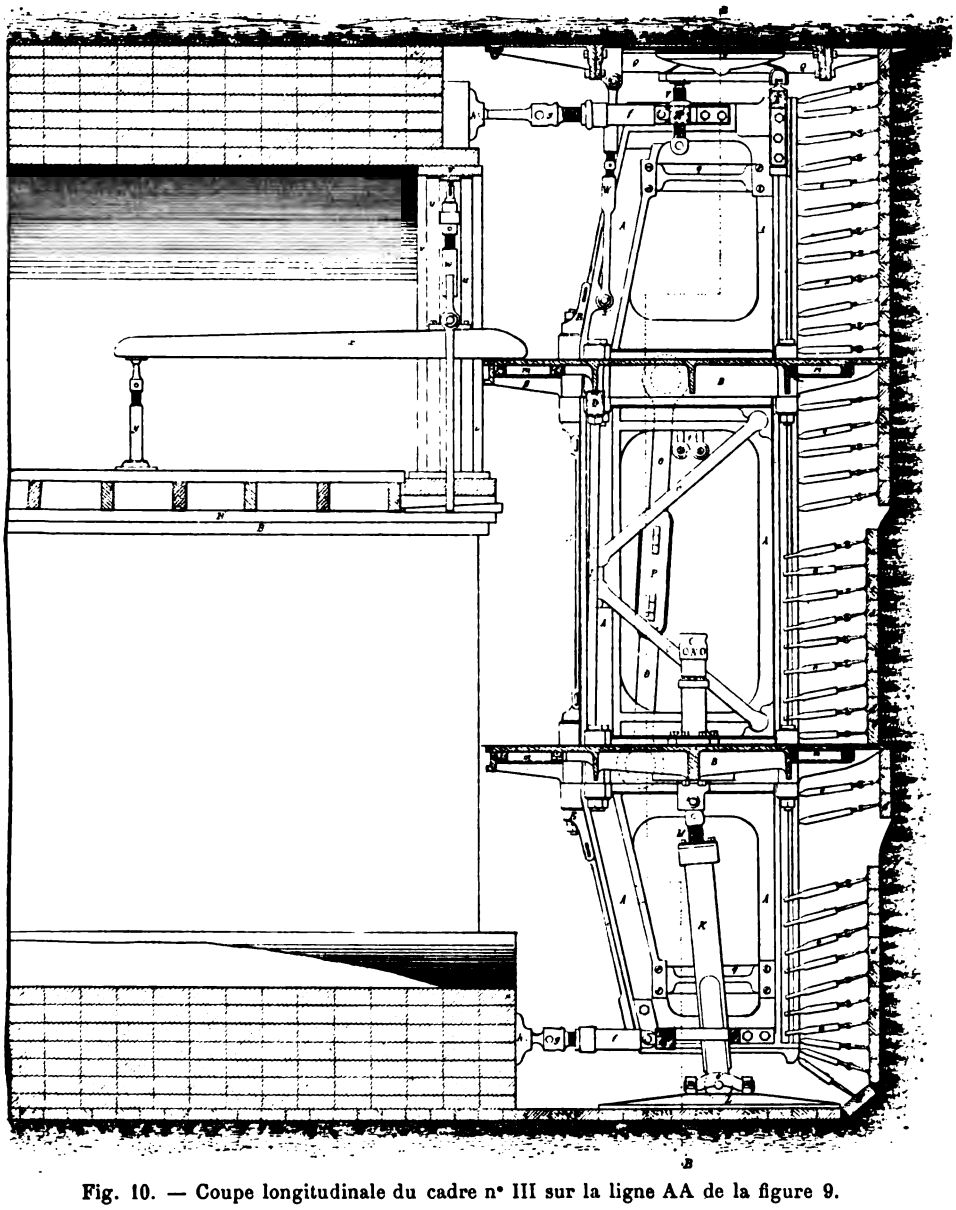


Fig. 10. — Coupe longitudinale du cadre n° III sur la ligne AA de la figure 9.

bandes de fer, appointées comme des palplanches et dénommées « douves », servaient à maintenir les terres.

Cadres. — Les « cadres » étaient numérotés de I à XII, en partant de la gauche, face au front d'attaque, ou de l'ouest. La figure 9 donne une élévation de la face arrière des cadres I et II et

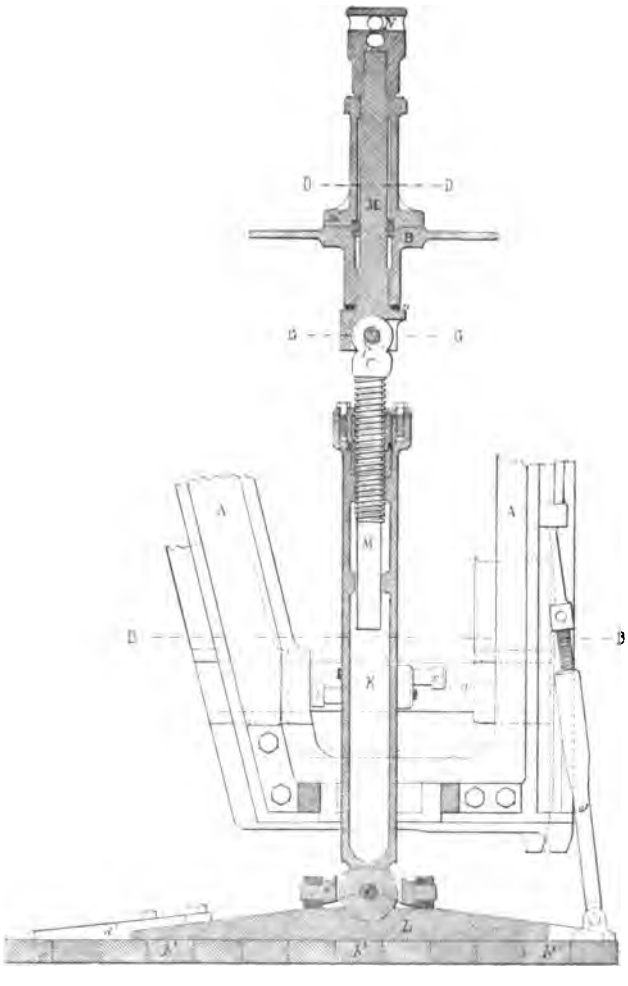


Fig. 11. — Coupe sur la ligne AA de la figure 12.

une coupe du cadre III. La figure 10 est une coupe longitudinale du même cadre ainsi que de la maçonnerie.

Les côtés de chaque cadre se composaient de six bâtis en fonte A, séparés par les deux planchers B, auxquels ils étaient solidement boulonnés. Ces bâtis étaient verticaux à l'avant, mais se

rétrécissaient en haut et en bas à l'arrière, de manière à laisser plus de place aux maçons. Ils étaient munis de nervures, pour les renforcer et permettre de placer les planches d'isolement. Pour leur donner plus de raideur, Brunel avait ajouté dans les cellules du milieu des tirants en fer diagonaux CC sur les flancs, et à l'arrière des étais DD, qui pouvaient être serrés par des écrous placés à leur partie supérieure.

Les plaques de plancher B étaient en fonte, renforcées en dessous par des nervures. En plus des 10 boulons, dont 4 à viroles (fig. 32), qui reliaient ces planchers aux bâtis, ils étaient réunis

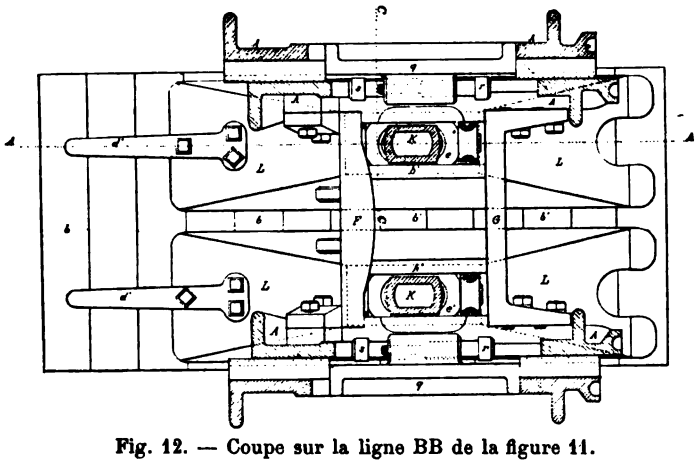


Fig. 12. — Coupe sur la ligne BB de la figure 11.

entre eux par deux fortes pièces de fer EE, fixées par des étriers et des clavettes à l'un des boulons de jonction.

A la partie inférieure, l'écartement des bâtis d'un même cadre était rendu invariable à l'aide de solides entretoises en fer F,G (fig. 10), auxquelles ils étaient boulonnés. Des entretoises analogues H et I existaient en haut, elles servaient à la fois à maintenir l'écartement et à porter le blindage du ciel. Quoique ces cadres paraissent très robustes et pussent supporter un effort de 1 000 t., ils ne l'étaient pas assez encore; car il n'en est pas un qui n'ait eu quelque pièce brisée au cours du travail.

Jambes. — Les cadres étaient portés par des pièces K, appelées « jambes ». La figure 11 en donne la coupe. Chaque jambe se composait de trois parties : le pivot ou vis, le socle et la semelle.

La semelle L était une large pièce de fonte de 5 pieds de long (1, 52 m.) sur 16 pouces (0, 41 m.) de largeur; elle était plate et bien dressée en dessous de manière à répartir la pression sur le sol; ce dernier était recouvert de planches d'ormes. Pour éviter qu'elles ne tassent sous le poids du bouclier, on les enfonçait au préalable à l'aide d'un vérin C′ appuyé contre le cadre (fig. 11).

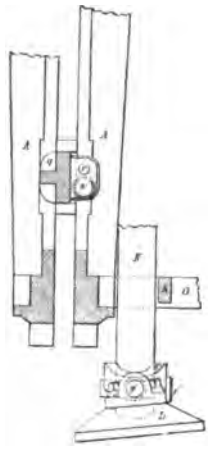


Fig. 13. — Coupe sur la ligne CC de la fig. 12.

Ce vérin devait rester en place jusqu'au moment où la semelle venait appuyer sur la planche; dans ce but, le bout avant de la semelle se divisait en deux doigts qui s'avançaient de chaque côté du vérin. En arrière deux crampons *d′* servait à empêcher le soulèvement des planches par la sous-pression, après l'avancement de la semelle, et à les maintenir, jusqu'à ce que la maçonnerie fût exécutée.

Le socle (fig. 12, 13 et 14) était réuni à la semelle par un collier en fer *e′*, et deux axes *f′* et *g′* à angle droit, ce qui permettait à la semelle de suivre toutes les inégalités du sol sans compromettre la stabilité du cadre. Cette articulation peut être comparée à une cheville humaine. La figure 11 montre d'ailleurs que le poids de la jambe était reporté directement sur la semelle au moyen d'une

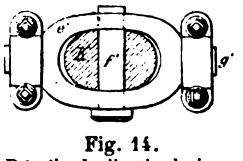


Fig. 14. Détails de l'articulation.

Fig. 15. — Coupe sur la ligne GG de la figure 11.

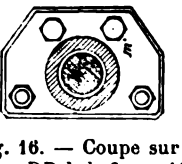


Fig. 16. — Coupe sur la ligne DD de la figure 11.

rotule engagée dans une crapaudine, et que par suite le collier et les axes, n'ayant aucun effort à supporter, servaient seulement de guide et de liaison. La figure 12 fait voir en outre que la jambe était aplatie, dans sa partie inférieure et passait dans une fente ou glissière, formée par les barres *h′h′*, attachées d'une part aux entretoises inférieures F et G et de l'autre aux côtés du bâti. Cette

glissière avait pour effet d'empêcher la jambe de tourner autour de la cheville, dont l'unique but était au contraire de permettre à la semelle de tourner autour de la jambe.

La partie supérieure de la jambe (fig. 11, 15 et 16) portait une douille en bronze filetée K', dans laquelle s'engageait la grosse vis M formée de deux pièces. La tête de la vis était double et tournait autour d'un axe *l'*, qui jouait le rôle du genou. La pièce portant cet axe passait à travers le plancher de la cellule du milieu, traversait une colonne creuse *m'* et se terminait par une tête de cabestan N, qui permettait de faire tourner la vis soit pour soulever le cadre, soit pour comprimer le terrain. Une rondelle d'acier *n'* (fig. 11) était insérée entre les portées de l'axe et du plancher, pour diminuer le frottement et faciliter les mouvements de la vis.

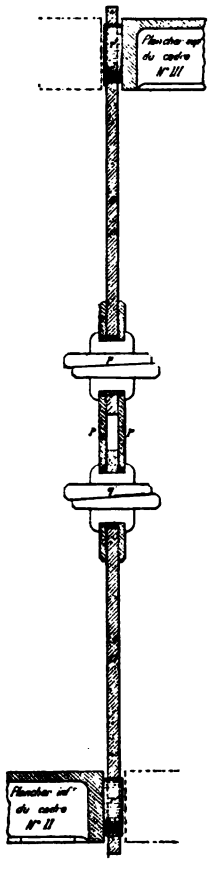


Fig. 17. — Coupe longitudinale du bras.

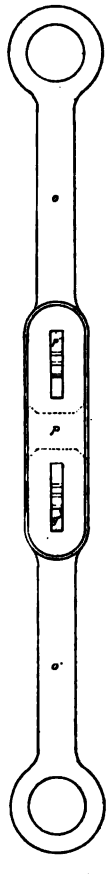


Fig. 18. — Vue latérale du bras.

Bras. — Les « bras » étaient destinés à reporter la charge d'un cadre sur les voisins et à permettre l'avancement facile du cadre ainsi allégé. Ils se composaient (fig. 17 et 18) de deux fortes barres de fer *o*,*o'*, réunies par des joues, à travers lesquelles passaient deux clefs *p'*, *q'*, destinées à en régler la longueur. Les extrémités terminées par un œil étaient fixées par des axes *r'*, *r'*, aux planchers B supérieurs des cadres impairs et aux planchers B inférieurs des cadres pairs (fig. 33 et 34). L'enfoncement des clefs *p'* avait pour effet de raccourcir les bras et de soulever les cadres pairs ; la clef inférieure *q'* produisait l'effet inverse. Ces bras permettaient également d'égaliser la pression sur le terrain, de sou-

lager les semelles des cadres qui avaient une tendance à s'enfoncer et de réparer les jambes.

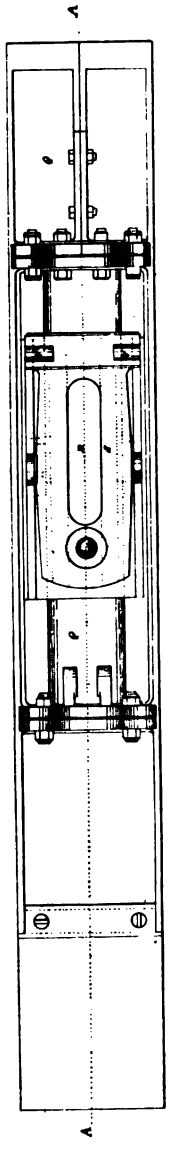


Fig. 19. — Vue par-dessous d'une douve de sommet avec la selle et le pivot.

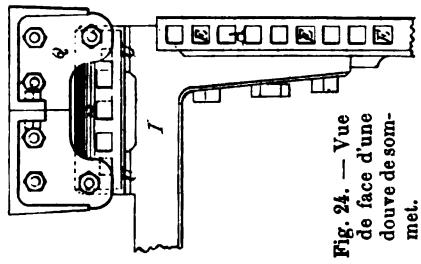


Fig. 24. — Vue de face d'une douve de sommet.

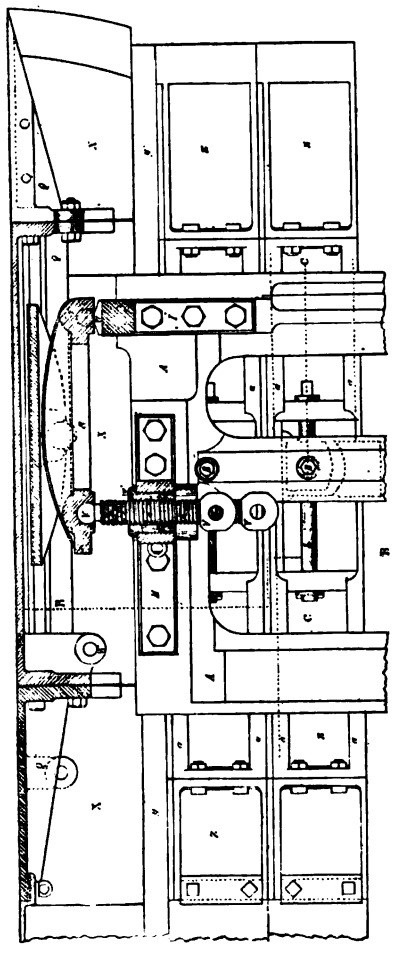


Fig. 20. — Coupe de la partie supérieure du cadre n° I sur la lige AA de la figure 9.

Douves. — Le ciel de la fouille était porté dans chaque cadre

par deux douves Q (fig. 19 et 20) de 18 pouces (0,46 m.) de largeur et 10 pieds 6 pouces (3,20 m.) de longueur, dont la face supérieure était plate et lisse de manière à offrir le moins de résistance possible au frottement. Elles se composaient de trois parties, la queue, le corps, et la pointe, boulonnées entre elles au moyen de nervures. La pointe se divisait en deux pièces (fig. 24) de manière à pouvoir être réparée plus facilement et se terminait

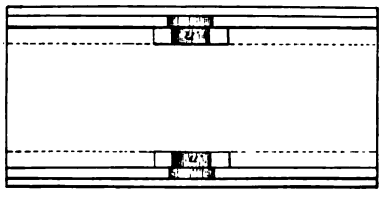


Fig. 21. — Plan de la selle.

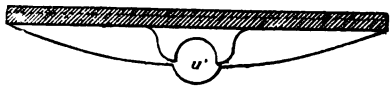


Fig. 22. — Coupe de la selle.

par un tranchant qui pénétrait de 6 pouces (0,15 m.) dans le terrain en avant du front d'attaque. La queue était prolongée par une plaque mince de fer *s'* qui recouvrait la maçonnerie sur plusieurs pouces. Les douves de toit étaient disposées de manière à pouvoir être légèrement montées ou abaissées suivant les besoins ou prendre une certaine inclinaison sur l'horizontale. A cet effet, le corps de la douve reposait sur une selle en fonte R (fig. 21 et 22). Les surfaces de ce contact de la douve et de la selle étaient parfaitement dressées et des éclats de bois *t' t'* intercalés pour diminuer le frottement. A la partie inférieure de la selle, il y avait deux entailles semi-circulaires (fig. 23), reposant sur deux axes T, fixés à un levier S et autour desquels la selle et la douve pouvaient tourner et s'incliner. Le levier S était porté par les entretoises supérieures du cadre H et I, d'une part au moyen des blocs U

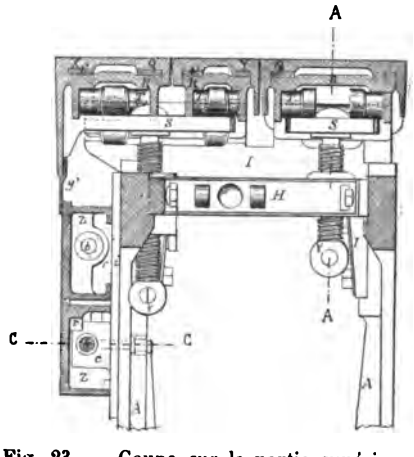


Fig. 23. — Coupe sur la partie supérieure du cadre I, suivant la ligne BB.

(fig. 20) entrant dans des entailles semi-circulaires v' à sa face inférieure et constituant le point fixe, d'autre part par la vis V qui traversait l'entretoise H, dans la botte w' et servait à soulever le levier S, la selle R et la douve. La douve était en outre attachée à l'arrière à un fort vérin W (fig. 9 et 10), fixé à un axe x', faisant corps avec le bâti. Ce vérin se composait de deux écrous, embrassant une tige filetée à ses deux bouts en sens contraires, et munie d'une tête de cabestan ; il servait à faire tourner la selle et la douve autour de l'axe T, d'attache au levier. En agissant à la fois sur ce vérin et sur le levier, la douve pouvait prendre tous les mouvements nécessaires et notamment être montée ou abaissée parallèlement à elle-même.

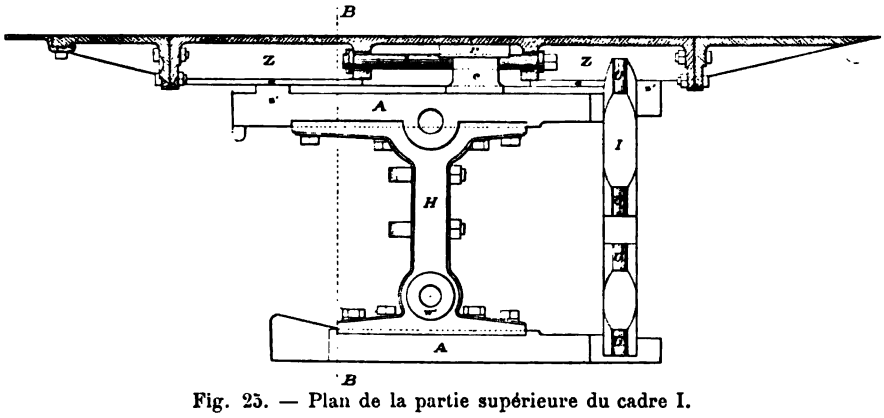


Fig. 25. — Plan de la partie supérieure du cadre I.

Les cadres d'extrémité I et XII présentaient une disposition un peu différente; il y avait trois douves Q, X et Y (fig. 23). La douve d'angle X présentait deux faces, une en haut et une de côté ; elle avait 15 pouces (0,38 m.) de hauteur et 14 pouces (0, 36 m.) de largeur; la douve voisine Y avait la même forme que les douves ordinaires, mais n'avait que 11 pouces (0, 28 m.) de largeur. En outre ces deux douves avaient bien des selles indépendantes, mais elles reposaient sur le même levier.

Sur les flancs (fig. 23, 25 et 26), la terre était également maintenue par des douves analogues à celles du toit de 10 pieds (3, 05 m.) de longueur et 12 pouces (0, 305 m.) de largeur. En outre, afin d'assurer la continuité du blindage, quelle que fût la position de

la douve mobile de toit X, cette dernière portait une plaque mince de fer y' qui recouvrait la première douve de côté. Les douves latérales s'appuyaient sur le bâti A du cadre extrême, dont le montant arrière était vertical sur toute la hauteur, au lieu de se rétrécir en haut et en bas comme dans les cadres intermédiaires; ce cadre portait en outre en son milieu un montant vertical spécialement destiné à servir de point d'attache aux douves, qui ne faisaient que s'appuyer contre les montants d'avant et d'arrière, simplement munis d'une glissière en saillie, bien dressée de 1 pouce (0,025 m.) de largeur. Dans deux saillies venues de fonte sur la face interne de la douve était engagé un long boulon, *b*, qui traversait une boîte en fonte *c*, fixée au montant spécial du milieu du bâti, par une vis β autour de laquelle elle pouvait tourner. Chaque douve pouvait donc prendre une certaine inclinaison et s'avancer indépendamment des autres.

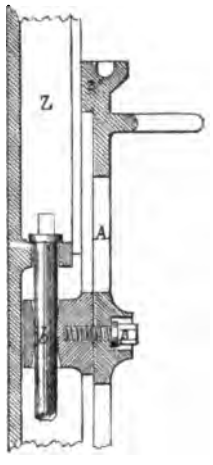


Fig. 26. Planche sur la ligne CC.

Blindage du front d'attaque. — Au front d'attaque le blindage se composait de planches métalliques (fig. 27, 28, 29), de 3 pieds (0,91 m.) de longueur, 3 pouces (0,076 m.) d'épaisseur et 6 pouces (0,15 m.) de largeur, placées horizontalement. A leurs extrémités,

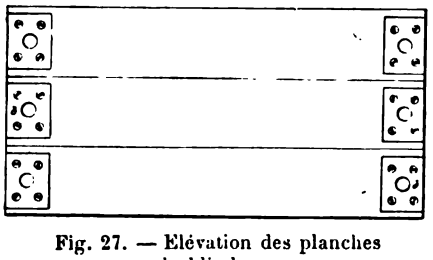


Fig. 27. — Elévation des planches de blindage.

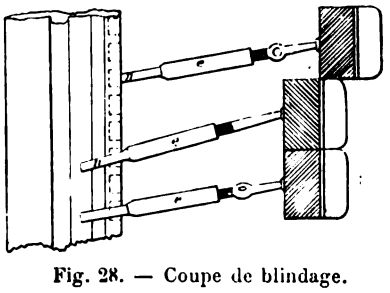


Fig. 28. — Coupe de blindage.

étaient vissées de petites plaques de fer δ, dans lesquelles existait une cavité hémisphérique, pour recevoir les têtes de vérins *e*, qui les appliquaient fortement contre le sol, en prenant pour point d'appui, à l'autre bout, le montant du cadre dans lequel étaient ménagés de même un grand nombre de trous ε pour les recevoir.

Ces vérins pouvaient être appuyés non seulement par leur tête n, mais aussi par un crochet θ, plus court de trois pouces (0,076 m.), suivant la distance de la planche au cadre. Quand il se produisait une excavation en avant du blindage, les planches ne rencontrant plus de résistance pouvaient tomber; sous l'action de la poussée des terres, elles pouvaient également tourner autour d'un axe horizontal passant par les têtes des deux vérins et ne plus faire joint avec les planches voisines. Brunel fut donc amené à les réunir en panneaux.

A l'extrémité de chaque planche, il mit deux vis λ et $\varkappa$ à têtes plates fixées dans des écrous sur la planche. La vis inférieure λ traversait un crochet plat, qui pouvait tourner autour de son axe et embrasser la vis $\varkappa$ de la planche située en dessous; en serrant les vis, les planches étaient rendues solidaires les unes des autres et ne pouvaient tourner. Pour empêcher le panneau de tomber en avant dans un affouillement, il y avait sur chaque cadre une demi-douzaine de vérins π (fig. 29) dont une extrémité s'accrochait aux têtes des vis $\varkappa$, λ, et l'autre à des boulons sur le bâti.

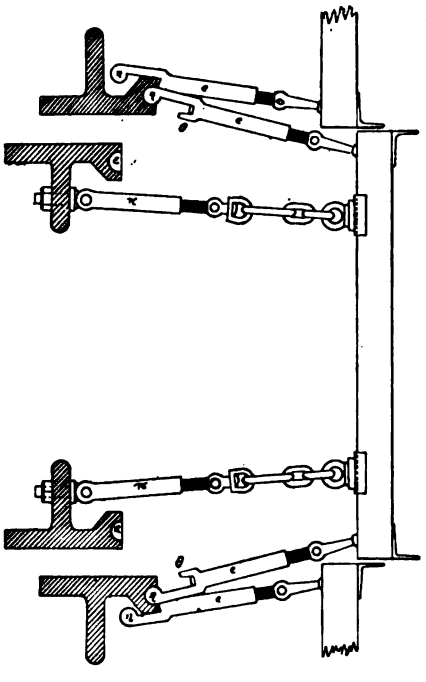


Fig. 29. — Coupe des panneaux de blindage.

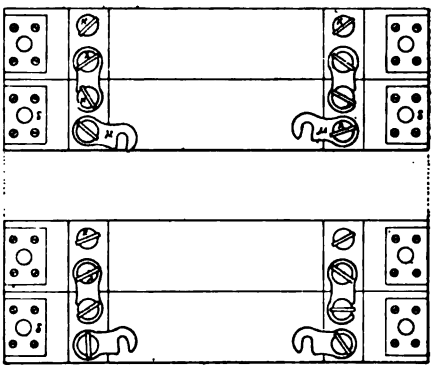


Fig. 30. — Elévation des panneaux de blindage.

Pour éviter le renversement des cadres sous la poussée des terres deux puissants vérins de butée (fig. 31) étaient placés dans

chaque cadre, l'un en haut, l'autre en bas, appuyés contre les entretoises H et F d'un bout et de l'autre contre la maçonnerie.

Ces vérins se composaient d'un socle *f* et d'une vis *g*. Le socle était en fonte et s'appuyait contre l'entretoise, à laquelle il était attaché par un axe à deux oreilles ; ce qui permettait après l'avoir desserré de le tourner pour laisser la place libre aux briquetiers. L'autre bout du socle contenait une boîte en bronze *k* formant écrou, dans laquelle s'engageait la vis *g;* cette dernière portait une tête de cabestan et venait prendre son point d'appui par une tête hémisphérique, dans une crapaudine ménagée dans une plaque de fer *h*, placée contre la maçonnerie. Des plaques de bois mince étaient toujours intercalées afin de répartir la pression sur une plus grande surface. Malgré cette précaution, la pression était parfois

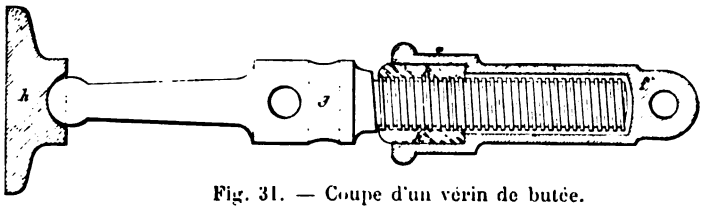


Fig. 31. — Coupe d'un vérin de butée.

assez forte pour écraser le bois et les briques et même pour casser la plaque de fer *h* et tordre la vis.

Ces vérins servaient d'ailleurs également à faire avancer les cadres après avoir pris soin de reporter la charge du blindage sur les cadres voisins.

Pièces diverses. —Des dispositions spéciales avaient été prises pour maintenir le parallélisme des cadres pendant leur avancement. La figure 32 représente une vue par-dessous du plancher inférieur du cadre III. *l*, *l*, *l*, *l*, étaient quatre secteurs en fer, (fig. 32 à 35), appelés quadrants, logés dans des boîtes *m* et et donc l'axe était fixé au plancher des cadres voisins. Ces boîtes étaient boulonnées au plancher, mais les trous de boulons étaient elliptiques et on pouvait régler leur position au moyen de deux longs coins *n n*, introduits entre elles et la nervure centrale du plancher. Une plaque de fer A, vissée sur la boîte, formant couvercle, maintenait les quadrants et empêchait l'introduction.

de tout corps étranger qui en aurait entravé le mouvement. Il y

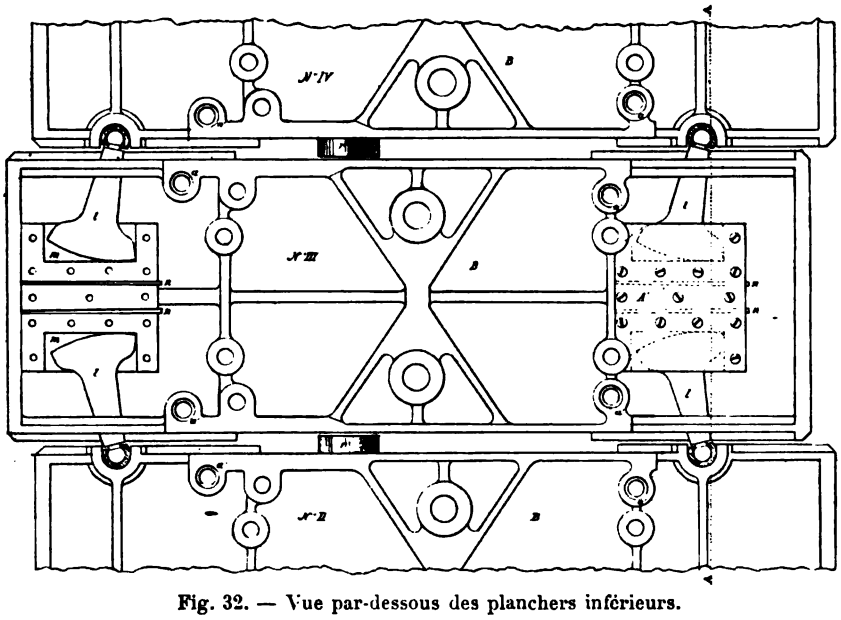


Fig. 32. — Vue par-dessous des planchers inférieurs.

avait 4 quadrants par plancher des cadres impairs, avec leurs axes sur les cadres pairs. Ces axes ou têtes étaient logés dans des cra-

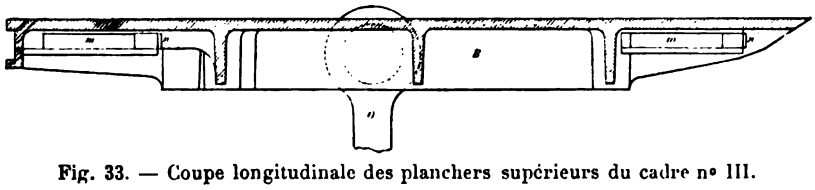


Fig. 33. — Coupe longitudinale des planchers supérieurs du cadre n° III.

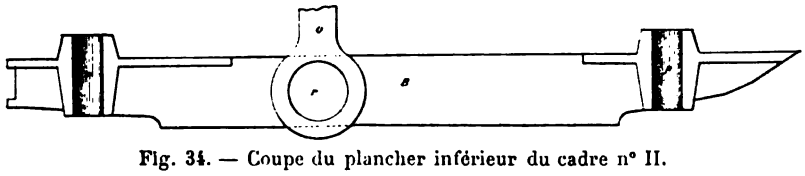


Fig. 34. — Coupe du plancher inférieur du cadre n° II.

paudines *o*, placées dans des entailles *p*, qui permettaient un mouvement relatif vertical (fig. 35). Ces quadrants maintenaient seulement l'écartement des cadres et les empêchaient de venir en contact et de se coincer l'un contre l'autre.

Pour régler l'avancement, les cadres impairs portaient dans les cellules inférieures et supérieures un appareil appelé « régulateur » (fig. 11, 12 et 13). Il se composait de fortes glissières en fer *q*, vissées sur le côté des cadres impairs et faisant saillie en dehors. Sur ces glissières étaient fixées deux vis à tête plate *r* et *s* qui, en venant buter contre les montants du bâti du cadre pair voisin, limitaient la course. Une dernière précaution était prise pour empêcher les divers cadres de se séparer les uns des autres; un tirant *t* (fig. 9 et 10), fixé au-dessous des planchers supérieurs, s'étendait à cet effet d'un bout à l'autre du bouclier. Ces divers dispositifs, tout en permettant de manœuvrer chaque cadre séparément, limitaient leurs mouvements relatifs et empêchaient toute dislocation dangereuse.

Le poids total du bouclier était d'environ 120 t.

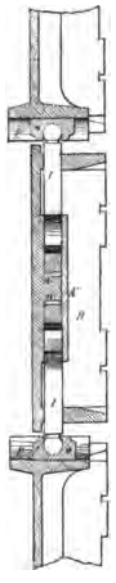


Fig. 35. — Coupe des planchers inférieurs sur la ligne AA.

Manœuvre d'avancement. — Les figures 36 à 39 donnent les différentes phases de l'avancement du bouclier. Dans la figure 36 le cadre III est à 3 pouces (0,076 m.) en arrière des cadres voisins; il en est de même de son boisage qui est maintenu à la distance normale de 17 pouces (0,43 m.) du cadre. Les ouvriers enlevaient alors successivement les planches et après avoir fait la fouille sur 3 pouces (0,076 m.) de profondeur, les replaçaient, mais en appuyant les vérins de soutien contre les montants des deux cadres voisins (fig. 37). Ils avançaient ensuite le cadre III dans la position de la figure 38, à 3 pouces (0,076 m.) en avant des voisins. Ils refaisaient alors une nouvelle fouille sur 3 pouces (0,076 m.) de profondeur en enlevant comme la première fois les planches une à une, mais en les replaçant (fig. 39), ils remettaient les vérins contre les montants du cadre III. Le cadre et les blindages avaient été ainsi avancés de 6 pouces (0,15 m.). Les positions relatives étaient renversées; la même opération s'exécutait sur les cadres pairs et ainsi de suite. Lorsque le terrain était bon, le travail pouvait être simplifié en exécutant la fouille sur 6 pouces (0,15 m.) d'un coup, au lieu de s'y reprendre à deux fois,

ce qui entraînait des modifications dans la manœuvre faciles à imaginer.

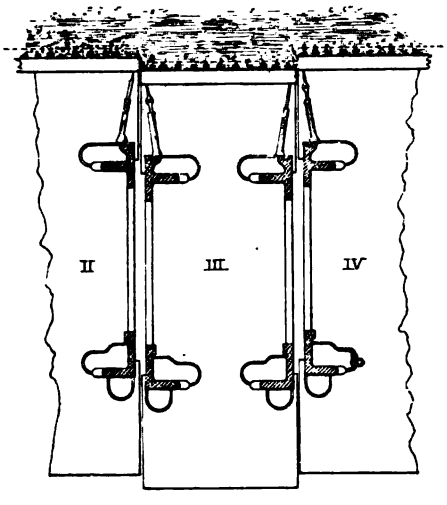


Fig. 36. — Vue en plan, 1re position.

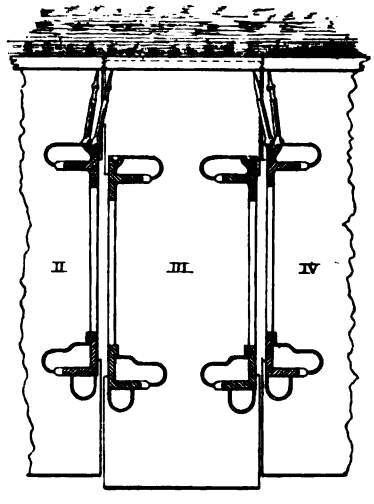


Fig. 37. — Vue en plan, 2e position.

L'opération de l'avancement du cadre dont il vient d'être parlé

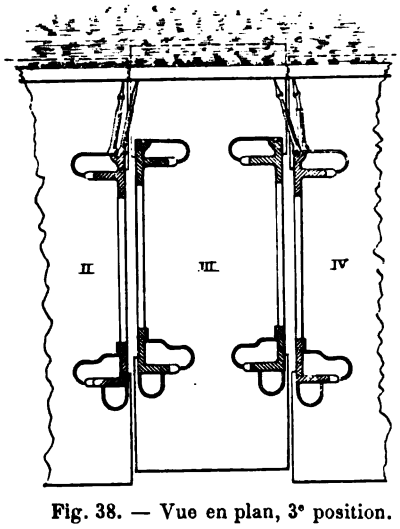


Fig. 38. — Vue en plan, 3e position.

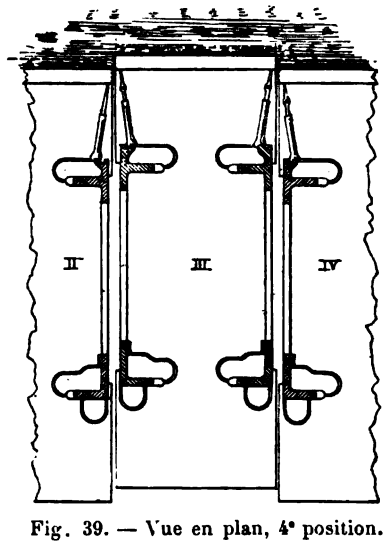


Fig. 39. — Vue en plan, 4e position.

commençait par les douves du toit qui pouvaient glisser sur les selles au moyen de vérins butés contre la maçonnerie. Quand elles

devaient pénétrer dans du sable ou du terrain un peu dur offrant assez de résistance pour les arrêter ou les briser, il fallait faire à l'avance devant la pointe une petite fouille qui était garnie d'argile bien malaxée, de manière à faciliter l'avancement tout en assurant l'étanchéité. Cependant, lorsque le terrain était facile, l'avancement préalable des douves était supprimé; elles étaient simplement rendues solidaires du cadre, en calant un bloc entre la selle et la nervure d'avant, ce qui les obligeait à avancer avec le cadre et économisait beaucoup de temps.

L'avancement du cadre comportait les phases suivantes : 1° serrage des clefs des bras, de manière à soulager le cadre et reporter son poids sur les cadres voisins; 2° desserrage des vis M de manière à donner du mou aux jambes et à pouvoir déplacer les semelles de 6 pouces (0,15 m.) en avant; 3° serrage des vis M de manière à peser suffisamment sur le plancher pour qu'il ne tasse pas sous le poids du cadre; 4° enlèvement des planches de boisage qui se trouvaient en face des deux planchers et bourrage avec de l'argile comme pour les douves de toit; 5° avancement général du cadre à l'aide des vérins de butée d'une quantité limitée par les régulateurs q. Il fallait avoir soin d'agir également sur les vérins et un homme, muni d'un fil à plomb, vérifiait à chaque instant la position et la faisait rectifier. Il ne restait plus qu'à remettre les planches de blindage devant les planchers, à serrer à fond les vis M des jambes et les vis V et W des douves de toit de manière à assurer un bon appui contre le sol, et à desserrer les clefs des bras.

Pour les cadres extrêmes, il fallait en outre avancer l'une après l'autre les douves latérales. Comme il n'y avait pas de bras pour soulager, et que par suite le frottement était beaucoup plus fort, un troisième vérin de butée avait été ajouté au niveau du plancher supérieur.

Installations diverses. — Le cintre servant à l'exécution des maçonneries (fig. 10) se composait d'un anneau en fer demi-circulaire, raidi par une nervure centrale et couvert par des couchis en bois de 16 pouces (0,40 m.) de longueur. Ce cintre était porté par une longue barre x, reposant d'un bout sur le plancher supérieur des cadres IV ou IX et de l'autre sur un vérin y, qui

permettait de l'élever ou de l'abaisser. Un vérin *w* placé dans l'axe servait au même but. D'ailleurs, ce cintre fatiguait peu ; car le premier rouleau de briques, exécuté en ciment pur, faisait voûte immédiatement.

La voûte était maçonnée derrière le bouclier dès qu'il y avait 9 pouces (0,225 m.) d'avancement; ce qui assurait une grande sécurité et soulageait la queue du bouclier. Le radier et les piédroits étaient faits par longueur de 18 pouces (0,45 m.) avec un mortier composé d'un mélange de ciment et de sable par parties égales. Dans les fondations et le bas des piédroits des blocs de 18 pouces (0,45 m.) carrés, furent souvent employés ; cette modification facilita beaucoup le travail dans les parties humides. Les tympans étaient, comme la voûte, montés par longueur de 9 pouces (0,225 m.) ; cependant, lorsque le terrain était exceptionnellement mauvais, l'épaisseur des anneaux était réduite à 4 pouces 1/2 (0,12 m.) ou même à 3 pouces (0,076 m.). A la fin, deux cours de dalles du Yorkshire B′ B′ (fig. 10) furent placées aux naissances ; elles servaient d'assises à la voûte et permettaient de la commencer avant l'achèvement des piliers. Il est évident que le travail des maçons et des mineurs était subordonné l'un à l'autre et qu'ils devaient s'attendre réciproquement, surtout pour le déplacement des vérins de butée.

Il était indispensable de placer entre la maçonnerie de voûte et la queue du bouclier de petits coins en bois, de manière à faire un joint aussi étanche que possible.

Un échafaudage de service (fig. 10) était établi à hauteur des naissances.

Les eaux étaient à l'origine renvoyées au puits par des pompes à bras ; mais il fallut à certains moments en établir jusqu'à quarante, ce qui devenait excessivement coûteux. Pour diminuer les frais, Brunel installa, dans le fond du puits, une pompe horizontale à vapeur, qui aspirait par un tuyau de 600 pieds (180 m.) les eaux dans un puisard établi au point bas du souterrain et dans lequel elles venaient se réunir au moyen d'une rigole dans chaque arche. Cette pompe fut encore souvent insuffisante ; et il fallut établir, contre les piédroits, des coulottes dont la pente était dirigée vers le puits et dans lesquelles l'eau était remontée à bras.

Dans le puits, les eaux étaient enlevées par quatre pompes à plongeurs mues par la machine à vapeur et pouvant élever chacune 500 gallons d'eau (2 273 litres) à la minute. Toute l'eau pompée passait par une vanne et était jaugée toutes les demi-heures, de manière à pouvoir constater immédiatement toute augmentation de débit et avertir l'équipe occupée à l'avancement de prendre toutes les précautions nécessaires, dès qu'une augmentation anormale de cette venue d'eau faisait craindre un danger.

Première forme du bouclier. — Depuis l'origine des travaux, jusqu'à l'accident de 1828, Brunel s'était servi d'un bouclier beaucoup moins parfait que celui qui vient d'être décrit et qui fut installé à la reprise du travail. Ce premier bouclier n'avait que 20 pieds 6 pouces (6,25 m.) de hauteur au lieu de 22 pieds 3 pouces (6,88 m.)et 35 pieds 6 pouces (10,82 m.) de largeur au lieu de 37 pieds 6 pouces (11,43 m.) et ne faisait saillie que de 7 pieds (2,13 m.) au lieu de 9 (2,74 m.) par rapport à la maçonnerie. Cet élargissement a été nécessaire pour donner du jeu entre les différents cadres, qui n'étaient séparés que par des coins et des rouleaux et se serraient sous la poussée des terres en se coinçant.

Les sondages avaient fait espérer que le souterrain pourrait être ouvert dans l'argile. Le bouclier primitif avait donc été construit en prévision d'un terrain de cette nature. Il était moins fort que celui qui a été décrit. Mais il en différait surtout par les points suivants :

1° Il n'avait pas de bras ; les jambes qui portaient toute la charge fatiguaient énormément. Il fallut les renforcer ; néanmoins elles se brisaient souvent et le cadre tassait ; il était alors nécessaire, pour l'exécution de la maçonnerie de voûte, de fouiller jusqu'à 1 pied (0,30 m.) au-dessus des douves ;

2° Les semelles portaient directement sur le terrain, sans l'intermédiaire d'un plancher préalablement enfoncé à force ; comme le sol tassait inégalement, les semelles portaient à faux, et, le joint universel n'existant pas, il se produisait des ruptures ;

3° Il n'y avait pas de quadrants et les cadres se serraient souvent à tel point qu'il était impossible de les faire avancer et qu'ils se brisaient sous l'action des vérins ;

4° Il n'y avait pas de queue au bouclier et le terrain, restant à nu entre les douves et la voûte, s'éboulait souvent sans laisser le temps d'exécuter la maçonnerie;

5° Les douves reposaient directement sur des plaques sans l'intermédiaire des selles et des leviers et il était très difficile de les redresser quand elles étaient déplacées.

Brunel s'aperçut bien vite de ces inconvénients et, quoiqu'il y eût remédié autant que possible, on ne peut qu'être emerveillé du travail fait avec un outil aussi imparfait et admirer l'habileté, le courage et la tenacité de cet ingénieur et de ses collaborateurs.

Marche des travaux. — Le puits était terminé au milieu du mois d'octobre 1825. Seulement, comme il avait été arrêté avant

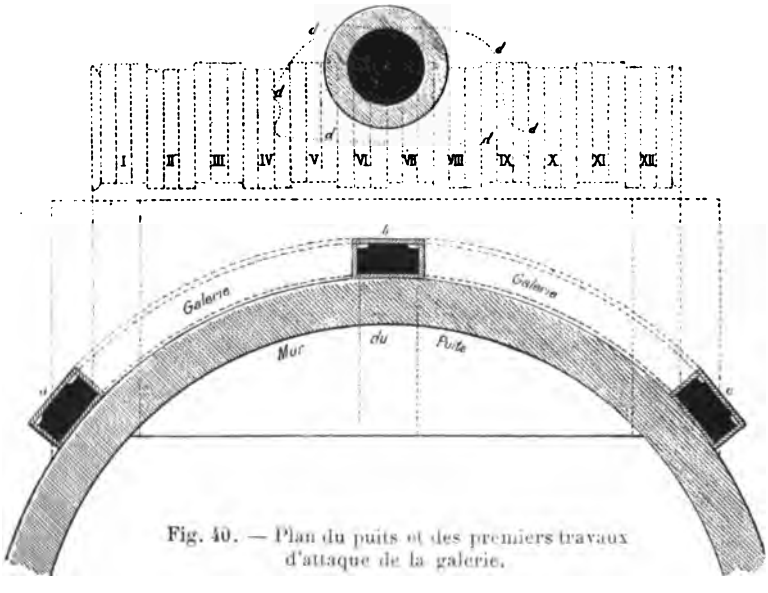


Fig. 40. — Plan du puits et des premiers travaux d'attaque de la galerie.

la couche de sables mouvants à 5 pieds 1/2 (1,52 m.) plus haut qu'il n'avait été prévu, l'ouverture ménagée dans la paroi pour l'entrée du souterrain ne se trouvait plus à sa place. Il fallut en relever le sommet en démolissant la maçonnerie et démonter le rouet en fer qui aurait fait obstacle au passage du bouclier. L'enlèvement de ce rouet ne put se faire sans rouvrir les venues d'eau si péniblement étanchées et l'opération ne put réussir qu'en des-

cendant trois petits puits en dehors des parois du grand, comme l'indique la figure 40, et en exécutant une galerie extérieure indiquée sur la figure en *traits ponctués* qui servit notamment à détourner et à recueillir les eaux.

A la fin de novembre le bouclier fut mis en marche; mais le terrain avait été tout bouleversé par le fonçage du puits ; les points d'appui manquaient pour l'avancement du bouclier, les ouvriers étaient tout à fait inexpérimentés; aussi l'avancement fut-il des plus laborieux et n'atteignait-il que 5 pieds (1,52 m.) au 20 décembre. Un mois après, le 20 janvier, le bouclier était à 12 pieds (3,66 m.) et se trouvait en plein gravier; l'eau envahit la fouille. Il fallut encore recourir à un petit puits provisoire, qui permit de constater que la couche d'argile avait cédé, et qu'il s'y était formé un affouillement, sur la surface *d d* (fig. 40), entièrement rempli de sable, de gravier des couches supérieures et d'eau. Le travail sur ce point dura jusqu'au 11 février 1826. En réalité, l'avancemant régulier ne commença que le 6 mars, quand le bouclier fut sorti des terrains bouleversés pendant le fonçage du puits. Il était alors à 29 pieds (8,84 m.). Le 31 mars, le souterrain avait une longueur de 58 pieds 8 pouces (17,88 m.). En avril, il devint indispensable de relier avec des chaînes les cadres qui se séparaient les uns des autres ; beaucoup de temps fut perdu à exécuter des fouilles supplémentaires rendues nécessaires par une déviation générale du bouclier vers l'ouest; aussi n'était-il, au bout du mois, qu'à 90 pieds (27,43 m.). Pendant le mois de mai, il fallut remplacer beaucoup de pièces brisées, notamment les jambes qui étaient trop faibles. Au commencement de juin, l'avancement atteignait 120 pieds environ (36,57 m.), mais le mois fut perdu à reculer le bouclier qui s'était encore une fois dévié de la ligne droite, à remplacer les jambes cassées par d'autres plus fortes, et à intercaler des rouleaux entre les cadres ; aussi, le 30 juin, la longueur faite était-elle à peine de 143 pieds (43,59 m.). En juillet le remplacement des jambes fut continué : la plus grosse difficulté vint de la rencontre d'un peu de vase qui cédait sous la pression des douves; cependant l'avancement fut meilleur puisque le bouclier arriva à 192 pieds (58,52 m.). En août, la compagnie reconnut nécessaire de confier à un ingénieur, M. Gravatt, le soin de diriger le

bouclier dont les pièces étaient continuellement brisées ou déplacées par suite de la brutalité des ouvriers. A la fin du mois, après six mois de travail régulier, le bouclier avait parcouru 230 pieds (70,10 m.) avec un avancement moyen de 10 m. par mois qui s'expliquait par les nombreuses avaries que l'on avait perdu beaucoup de temps à réparer.

En septembre, il y eut à lutter contre des difficultés nouvelles dues à l'action de l'eau qui délayait et ramollissait le terrain et se faisait jour dans la petite partie laissée à nu en arrière des douves jusqu'à l'exécution des maçonneries. Généralement ces venues d'eau avaient pour conséquence le dérangement des douves, qu'il était très difficile de replacer et le danger s'aggravait d'autant qu'il restait des vides entre ces douves déplacées. C'est à ce moment que Brunel essaya sur deux cadres l'emploi des selles. Au commencement d'octobre, l'avancement arrivait à 266 pieds (81,07 m.); la transformation des douves que de fréquentes venues d'eau rendaient chaque jour plus nécessaire fut poursuivie en abandonnant les anciennes (fig. 41). En outre, le sol détrempé par l'eau ne pouvait plus supporter le poids des semelles; c'est alors que fut commencée la pose du plancher. L'avancement atteignit ainsi 290 pieds (88,39 m.). En novembre, la venue d'eau et les difficultés ne firent qu'augmenter; il fallut installer un second ingénieur résident M. Riley. Le bouclier avait fait 320 pieds (97,53 m.), mais il était bien désorganisé.

A cette époque, Brunel commença à se préoccuper de l'insuffisance des pompes, d'autant plus inquiétante que, par suite de la pente du tunnel, plus l'avancement s'éloignait, plus la quantité et la hauteur de l'eau qui pouvait s'accumuler à l'avancement sans écoulement devenaient dangereuses. Aux difficultés toujours croissantes, inhérentes au travail, vint s'ajouter un grave accident dû à la maladresse d'un ouvrier, qui desserra les vérins de butée d'un cadre sur lequel étaient précisément appuyés les blindages des deux cadres voisins. Ce cadre recula brusquement et les blindages tombèrent. Cependant, malgré cet accident et l'augmentation de la venue d'eau, il avait été fait, au 1er janvier 1827, une longueur de 355 pieds (108,20 m.), c'est-à-dire un avancement moyen depuis le mois de mars d'un peu moins de 10 m. par mois.

En janvier, la quantité d'eau continua à augmenter si bien qu'un simple arrêt accidentel de pompe suffit à la faire monter au niveau du premier plancher. Le terrain commença également à changer de nature ; l'argile fit place à de la vase qui faisait irruption dans le bouclier dès qu'il y avait une surface découverte un peu grande.

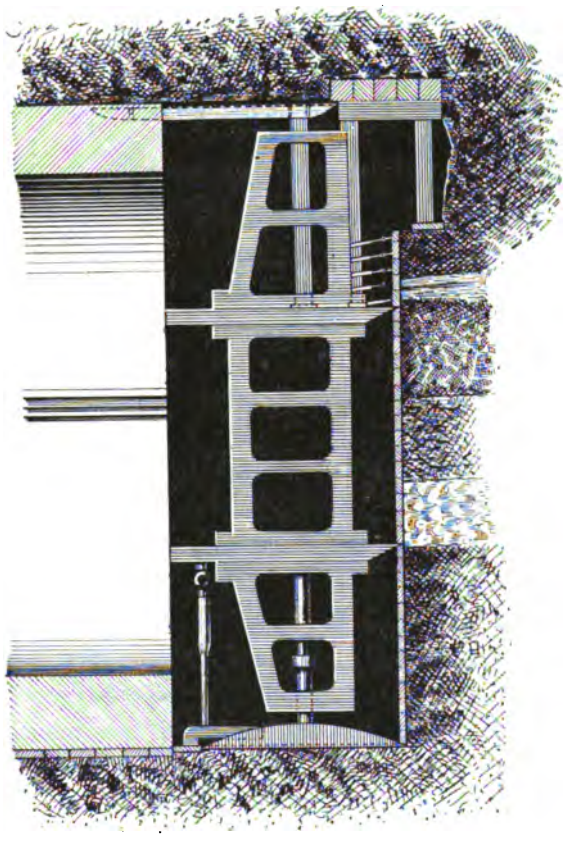


Fig. 41. — Changement des douves de toit.

Cependant, l'avancement s'améliora et la longueur faite atteignit 407 pieds (124,05 m.). Grâce à une grande dépense d'énergie, l'avancement fut presque aussi beau en février puisque le front de taille arriva à 460 pieds (137,16 m.), mais les difficultés furent telles que l'un des ingénieurs, M. Riley, mourut de fatigue. Le terrain continua à changer dans le courant de mars ; à la vase

succédèrent le gravier et l'eau ; le simple déplacement d'une planche suffisait à produire des éboulements et des excavations. Le 30, l'avancement était à 508 pieds 6 pouces (154,97 m.). En avril, dans ses rapports, Brunel se plaignait de l'insubordination des ouvriers, du mauvais sol et de l'abondance de l'eau qui nécessitait par moment 40 pompes à bras. Inquiet des éboulements et des excavations qui se produisaient à tout instant, il fit venir une cloche à plongeur et reconnut de nombreux tassements dans le fond du lit de la rivière. Le bouclier était alors à 540 pieds (164,59 m.) du puits.

Dès le commencement de mai, les accidents s'aggravèrent surtout à la suite d'un arrêt causé par une grève d'ouvriers. Les tassements du lit de la rivière augmentèrent et, le 12 mai, eut lieu le premier accident grave dont Brunel rendit compte en ces termes :

« En avançant le cadre VI, par négligence on laissa en arrière « les deux douves du toit et on enleva les deux planches de face du « haut. Le terrain déjà naturellement mauvais (c'était la pleine « mer), commença à gonfler juste comme j'arrivais. Je donnai « l'ordre à Ball qui arrivait précisément de dresser le terrain ; « quand la fouille eut la profondeur voulue, il replaça les deux « planches, mais nous essayâmes en vain de replacer les vérins « d'appui, qui étaient trop longs, contre le terrain qui continuait à « gonfler très rapidement au-dessus de nous. Nous fûmes obligés « de le laisser gagner sur nous jusqu'à ce que nous puissions obte- « nir d'autres outils ; mais l'écoulement devint bientôt insurmon- « table ; il roulait des mottes de plus de 2 pieds cubiques (0,056 m³.). « Au même moment, le terrain commença à couler entre les « cadres III et IV, au sommet du front d'attaque, et le blindage « des cadres IV et V commença à glisser un peu, ce qui était très « dangereux. Godvin alla au sommet du cadre IV et je donnai « l'ordre à Burn de consolider le boisage de face au milieu avec « des douves. Pendant ce temps, on avait pu refaire la fouille du « cadre VI et replacer les planches ; mais on ne put les fixer assez « solidement faute de vis plus courtes. Il en résulta que la terre « envahit la cellule une seconde fois ; dès qu'on l'enlevait, il en « revenait autant et à une telle hauteur que Ball était obligé de « travailler à plat ventre. Pendant que l'on essayait de fixer les

« planches avec une longue vis butée à l'arrière, le terrain descen-
« dit avec un fracas effrayant, de plus en plus meuble et mouillé,
« roulant dans la cellule de telle sorte qu'il devint impossible
« d'arriver jusqu'aux boisages et que nous fûmes chassés de force.
« L'ennemi s'était définitivement emparé de notre ouvrage ; nous
« dûmes fermer l'arrière de la cellule
« en mettant des planches en dedans
« des nervures des montants et les
« côtés en en plaçant d'autres entre
« les cadres V et VI d'une part, et VI
« et VII d'autre part, de manière à
« maintenir la terre et à l'enfermer
« dans la cellule. Nous y réussîmes
« tant bien que mal, et quoique le ter-
« rain filtrât au début par les joints
« des planches, nous réussîmes à en
« être maîtres. Par suite de l'obs-
« tacle, il devint de plus en plus dense,
« s'arrêta et devint tranquille. A ce moment, je fus appelé aux
« cadres VII et VIII ; il y avait à l'arrière un écoulement considé-
« rable de vase et d'eau. Le même fait se produisait en même
« temps au cadre I et avec plus d'importance aux cadres X et XI ;
« la quantité d'eau fut pendant un certain temps considérable ;
« mais après avoir mis les mineurs du bas aux pompes, ils ne la
« laissèrent pas monter au-dessus des vérins, à 12 ou 15 pouces
« (0,30 m. à 0,40 m.) ; cela dura douze heures, après quoi tout
« s'assit et les craintes cessèrent. »

Fig. 42.
Accident du 12 mai 1827.

On voit quelles conséquences avaient eues un simple oubli et quelles difficultés énormes étaient rencontrées. Quand il rentra dans le cadre VI après l'accident, M. Gravatt ramassa près des douves du sommet, au milieu de beaucoup d'autres débris provenant du fond de la Tamise, une pelle et un marteau qui avaient été laissées par Brunel quand il avait examiné le fond du lit le 25 avril avec la cloche à plongeur.

Le 17 mai, quelques jours après, des vaisseaux s'étant amarrés au-dessus du souterrain, il se produisit un remous qui délaya la vase du fond. L'eau put pénétrer avec plus d'abondance encore

que d'habitude dans le gravier et le 18 elle envahit les galeries, sans que cette fois, malgré des efforts désespérés, les ouvriers pussent l'arrêter. Après avoir lutté jusqu'au bout, ils ne s'échappèrent qu'à grand'peine.

Après l'accident Brunel descendit à plusieurs reprises avec la

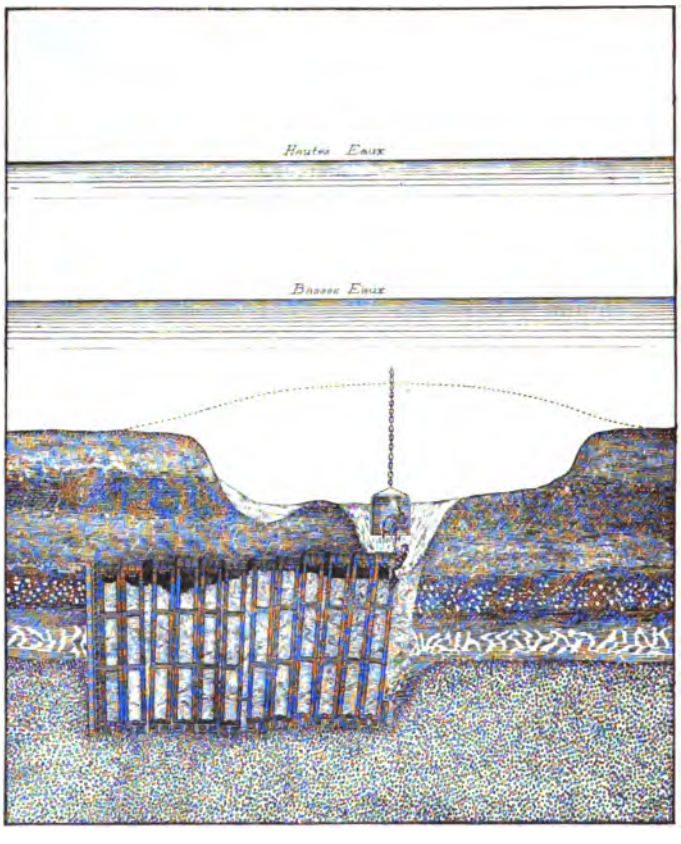


Fig. 43. — Coupe en travers. — Visite du bouclier après l'accident.

cloche à plongeur (fig. 43) pour examiner l'excavation qui s'était formée dans le fond du lit. Il put parvenir jusqu'au bouclier et reconnaître que, s'il s'était très disloqué, il était cependant toujours en place. L'excavation avait 50 pieds (15,24 m.) de diamètre ; elle se terminait par une sorte d'abîme d'environ 10 pieds (3,05 m.) de longueur sur 7 pieds (2,13 m.) de largeur, qui mettait à nu les douves du sommet des cadres X, XI et XII ; il y

avait en outre une dépression de 12 pieds (3,66 m.) en avant des cadres VI et VII, dont le fond était absolument mou. Le cube de l'éboulement fut évalué à 25 000 pieds cubiques (705 m³.).

La première opération consista à placer, au-dessus du bouclier, avec la cloche à plongeur, une grande quantité de sacs d'argile attachés les uns aux autres, afin de bien l'isoler de la rivière. Cette première couche fut recouverte par des sacs d'argile, traversés par des baguettes de noisetiers de 5 pieds (1,52 m.) de longueur afin d'éviter qu'ils ne puissent descendre et de les forcer à se coincer les uns contre les autres. Le 24 mai, les pompes furent mises en marche à titre d'essai et réussirent à faire baisser le plan d'eau dans le souterrain, sans toutefois pouvoir le mettre à sec. Brunel fit alors couler au-dessus des sacs un grand radeau

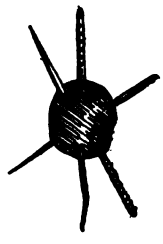


Fig. 44.
Sacs d'argile.

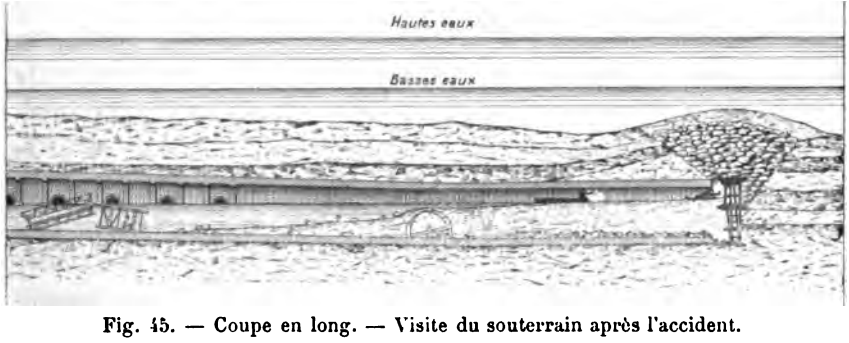


Fig. 45. — Coupe en long. — Visite du souterrain après l'accident.

chargé de 250 tonnes et achever de remplir l'excavation avec des sacs d'argile et du sable. Il ne réussit pas du premier coup ; à diverses reprises l'eau se fit jour et le remblai tassa. Ce ne fut que le 20 juin que Brunel, l'ingénieur Beamish et deux ouvriers (fig. 45) purent pénétrer dans le souterrain. Ils reconnurent que les galeries étaient en partie remplies de terre et de débris de toute sorte, mais que la maçonnerie et le bouclier étaient en bon état. Cependant les planches de blindage et les vérins qui les maintenaient étaient tombés ou faussées, les cadres hors d'aplomb et il y avait des excavations et des venues d'eau de tous côtés. Ce ne fut qu'au

prix de beaucoup de temps et de danger que tout fut remis en ordre. Il se produisait à chaque instant des jets d'eau et de terres fluides ; les cadres se déplaçaient en brisant avec de fortes détonations les chaînes qui les reliaient. Le 28 juillet, les travaux de dégagement et de consolidation provisoire étaient terminés, mais ce ne fut que le 25 septembre que le remplacement des pièces brisées fut achevé et que l'avancement put être repris.

Le 31 octobre, le bouclier n'avait avancé que de 12 pieds (3,66 m.), ce qui donnait une longueur totale de 562 pieds (171,29 m.). Un mois plus tard, après un avancement des plus lents dans un sol absolument ramolli, il arrivait à 583 pieds 9 pouces (177,94 m.).

L'arrêt des fêtes de Noël eut des conséquences désastreuses ; car il laissa au terrain le temps de se délayer. Quelques jours après, le 12 janvier 1828, le second accident se produisit. Brunel en rendit compte comme suit :

« J'étais resté avec les ouvriers toute la nuit, et nous n'avions « constaté aucun signe de danger. A six heures du matin, au « moment du changement de poste, une équipe nouvelle reprit le « travail. Nous commençâmes à attaquer le sol à l'angle supé- « rieur ouest du cadre I ; la marée commençait à baisser et le « terrain paraissait tranquille ; nous étions descendus d'environ « 1 pied (0,30 m.) quand, en mettant à nu les 6 pouces suivants « (0,15 m.), le terrain commença tout à coup à gonfler et à couler « en grande quantité par l'ouverture. Cet écoulement fut accom- « pagné immédiatement d'une grande quantité d'eau. L'irruption « fut assez violente pour rejeter les hommes du cadre sur l'écha- « faudage en arrière. J'étais sur le plancher dans la cellule avec « eux, mais quand l'éboulement commença, je passai dans la « cellule voisine pour pouvoir mieux surveiller ce qui se passait. « Quand je vis que les ouvriers ne pouvaient arrêter l'eau, je « donnai l'ordre à tous les hommes de sortir des cadres. Ils se « retirèrent tous, sauf trois hommes qui étaient dans la même « cellule que moi. Je ne quittai l'échafaudage que quand ils eurent « descendu l'échelle des cadres. Nous avions pu avancer, eux et « moi, d'environ 20 pieds (6,10 m.) dans la galerie de l'ouest, « quand l'agitation de l'air, causée par l'irruption de l'eau, devin

« telle que toutes les lumières s'éteignirent. Nous avions de l'eau « jusqu'à la ceinture et j'étais en train d'expliquer aux trois « hommes le moyen de se diriger dans l'obscurité, pour s'échap- « per, quand eux et moi nous fûmes jetés à terre et recouverts « par les débris de l'échafaudage. Je luttai quelque temps sous « l'eau et arrivai à me sortir de l'échafaudage ; tout en nageant, « poussé par le courant d'eau, je gagnai le tunnel de l'est, où je « trouvai un meilleur sol ; je pus en me retenant au câble du « railway m'arrêter un instant, dans l'espoir d'encourager les « hommes qui avaient été jetés à terre en même temps que moi. « Je les appelai, mais sans résultat. Avant que j'atteignisse le « puits, l'eau avait monté au point que je n'avais plus pied et je « dus nager pour atteindre l'escalier. J'étais blessé aux genoux « par les poutres de l'échafaudage à tel point que je pouvais à « peine nager et monter l'escalier, mais le courant d'eau me « poussait vers le puits. Les trois hommes atteints avec moi ne « purent se dégager, et j'ai le regret de dire qu'ils sont perdus ; « je crois que deux hommes âgés et un jeune sont aussi restés « dans une autre partie du travail. »

Un examen avec la cloche à plongeur fit reconnaître qu'il s'était formé une forte excavation à l'ouest du souterrain, mettant le bouclier à nu. Elle fut remplie par le même procédé que la première fois ; toutefois les baguettes de noisetier furent remplacées par des tiges de fer et les vides entre les sacs d'argile furent remplis avec du sable, dans le but d'atténuer les tassements.

Le 6 avril, les ouvriers pouvaient commencer à dégager les galeries. Mais, quand ce travail fut terminé, la compagnie à bout de ressources dut se résigner à abandonner le travail, après avoir fermé l'extrémité du souterrain hermétiquement avec de la maçonnerie, de manière à pouvoir le maintenir à sec tout en réduisant les frais d'épuisements. Ce travail fut terminé le 15 août 1828. A ce moment, Brunel pouvait écrire :

« Le souterrain est terminé sur une longueur de 600 pieds (183 m.) « Les voûtes et autres ouvrages ont supporté sans accident deux « irruptions de la rivière. Ces deux faits ne peuvent manquer de « vous convaincre et de convaincre le public de la solidité de la « construction et de la confiance à accorder aux ouvrages terminés.

« Quant aux moyens de continuer les travaux, le souterrain « n'est maintenant qu'à 350 pieds (106,68 m.) de la limite des « basses eaux sur la rive nord. J'ai l'entière confiance de pouvoir « vaincre tous les obstacles et finalement d'achever le souterrain « avec la même solidité et la même perfection que les 600 pieds « (183 m.) déjà exécutés. »

Brunel dut cependant attendre sept ans pour reprendre le travail. Ce ne fut en effet qu'en 1835 qu'une subvention du gouvernement permit de rouvrir les chantiers. Brunel n'hésita pas à reconstruire entièrement le bouclier suivant le modèle perfectionné décrit ci-dessus. L'avancement fut repris en mars 1836. La marche fut d'abord très lente par suite des mouvements du sol. Le 11 juin, une irruption d'eau fit perdre six semaines. A la fin de l'année le parcours total était de 117 pieds (35,66 m.).

En 1837, il ne fut que de 28 pieds (8.53 m.). Les irruptions d'eau étaient devenues de plus en plus fréquentes et il avait fallu en outre lutter contre des dégagements de gaz qui, en faisant explosion, disloquaient les blindages. C'est à cette époque que, pour éviter les chutes de blindages, Brunel inventa de réunir les planches par des crochets de manière à former des panneaux, qu'il suffisait de maintenir en quelques points, si la formation d'excavations privait les planches de leur point d'appui contre le sol. Il ajouta également pour les empêcher de glisser des éperons en fer butés contre les planchers.

A la fin de 1838, il avait été fait, depuis la reprise, 250 pieds 6 pouces (76,35 m.). Mais le bouclier approchait de la rive ; aussi l'avancement atteignit-il, en 1839, 3 pieds (0,91 m.) par semaine. La longueur faite dans l'année fut de 249 pieds 6 pouces (76,04 m.), c'est-à-dire presque aussi forte que pendant les trois années précédentes. Il y eut encore des éboulements, notamment un de 13 pieds (3,96 m.) de profondeur et 30 pieds (9,14 m.) de diamètre, mais sans irruption d'eau.

En 1842, tout était terminé, et en 1843 le tunnel fut inauguré par Sir J. Rennie. C'est au cours de cette cérémonie que furent décachetées les bouteilles bouchées lors de la pose de la première brique en 1825.

La dépense totale s'éleva à plus de 600 000 livres sterlings

(1 500 000 fr.) ; ce qui fait ressortir le prix du yard courant à 1200 livres (32 800 fr. par mètre courant).

Conclusions. — Le récit assez détaillé des difficultés rencontrées et des accidents survenus au cours du travail permet de dégager les qualités et les défauts de l'outil admirable créé par Brunel.

Le défaut capital de ce bouclier était sa complication, mais cette dernière avait pour cause unique la faiblesse des ressources mécaniques et métallurgiques dont disposait l'inventeur. C'est pour ce motif qu'il dut fractionner son bouclier en cadres ; c'est pour diminuer l'effort à développer qu'il créa les jambes destinées à substituer un mouvement de rotation au mouvement de glissement ; qu'il introduisit les bras afin de diminuer la charge en la reportant sur les cadres voisins ; qu'il s'efforça de faciliter et de diriger le déplacement des douves de toit par l'introduction des selles et des leviers, enfin qu'il fractionna l'enveloppe en planches de blindage et en douves mobiles indépendantes les unes des autres. Mais cette division avait l'inconvénient de faciliter les déplacements, les resserrements et les dislocations, et quoiqu'il eût cherché à y remédier par les quadrants, les tirants et les régulateurs, elle n'en resta pas moins le point faible du bouclier et aggrava singulièrement les accidents quand elle n'en fut pas la cause première.

Mais s'il est fait abstraction de ces accessoires, inévitables dans les conditions où Brunel était placé, on trouve le germe de tous les boucliers postérieurs : l'enveloppe extérieure mobile offrant un abri pendant l'exécution de la fouille, les vérins pour la faire avancer, les cellules et les blindages fractionnant le front d'attaque qui se retrouveront au souterrain de Blackwall, les plaques de recouvrement de la queue du bouclier à l'abri desquelles on peut monter le revêtement définitif, le garnissage avec de l'argile de la fouille préparée pour l'avancement du couteau qui n'a réapparu que tout récemment aux travaux de construction du Waterloo and City Railway. Enfin, s'il n'a pu l'appliquer, Brunel avait imaginé, dès 1818, le revêtement en fonte qui, jusqu'à une époque toute récente, a été considéré comme le seul possible avec le bouclier, quoiqu'il ne fût pas réellement nécessaire dans tous les cas.

L'innovation, récemment introduite dans les boucliers français,

et qui a consisté à les appliquer à la construction des ouvrages en maçonnerie, et qui ouvre tout un horizon nouveau à la méthode, n'est en somme qu'une application nouvelle et perfectionnée de ce que Brunel avait fait lui-même avec succès, de même que l'abandon de l'emploi exclusif de la forme circulaire, que les successeurs de Brunel en Angleterre et en Amérique avaient considéré comme un dogme, sans trop en donner de raison, n'est qu'un retour à ce qu'avait déjà osé cet illustre ingénieur.

On ne saurait trop admirer l'abondance d'idées et de ressources dont il a fait preuve avec des moyens aussi imparfaits que ceux dont il disposait et, l'achèvement d'un travail aussi colossal, au milieu de difficultés inouïes, remplit d'étonnement et de respect pour ce maître.

CHAPITRE II

PÉRIODE ANTÉRIEURE A 1870

SOUTERRAIN DE LA TOUR DE LONDRES

PREMIERS BOUCLIERS AMÉRICAINS

Premiers brevets. — Pendant la longue interruption de sept ans des travaux du tunnel sous la Tamise, un brevet n° 6018 fut pris en 1830 par l'amiral Lord Cochrane, depuis comte de Dundonald. A en croire les termes du brevet, qui dit « qu'il s'agit d'une « entreprise semblable à celle en cours d'exécution sous la Tamise « à Rotherhithe », on est en droit de penser que Lord Cochrane avait en vue le travail même de Brunel [1]. Le brevet est conçu dans les termes suivants :..... un appareil pour comprimer « l'air et « maintenir la pression dans les fouilles souterraines..... afin que « le supplément d'élasticité obtenu par l'air et maintenu par lui à « l'aide de l'appareil..... pût compenser la tendance de l'eau, qui « se trouve au-dessus de la fouille, à y couler sous l'action de la « gravité... ; cet appareil est en même temps disposé de manière « à permettre aux ouvriers d'exécuter leur travail comme d'habi- « tude, pour foncer un puits, exécuter une fouille ou une galerie « ..... dans l'espace rempli d'air comprimé et aussi de passer faci- « lement de l'air comprimé à l'air libre et réciproquement. »

Le texte et le dessin (fig. 46) annexé au brevet montrent d'abord un puits foncé à l'air comprimé avec un sas à air au sommet, une chaîne à godets pour l'extraction des déblais et une écluse à air en

[1] On a dit également que l'ingénieur français Colladon avait proposé, dès 1828, à Brunel de combattre l'eau par l'air comprimé.

bas. Ils indiquent également une galerie ou un souterrain horizontal, avec un sas à l'entrée, prolongé jusque sous la rivière. Lord Cochrane pensait qu'il serait possible ainsi, sans autre précaution, de construire un tunnel sous une rivière, quelle que soit la nature du terrain traversé ; il disait « que dans certains cas la pression de « l'air devrait être suffisante pour équilibrer une colonne d'eau de « même hauteur que celle de la surface de l'eau dans la rivière « au-dessus du souterrain..... mais qu'il ne serait pas nécessaire « de maintenir toujours une pression aussi forte dans la fouille, « mais seulement quand le terrain rencontré serait assez meuble « pour faire craindre une irruption de la rivière dans le souterrain.

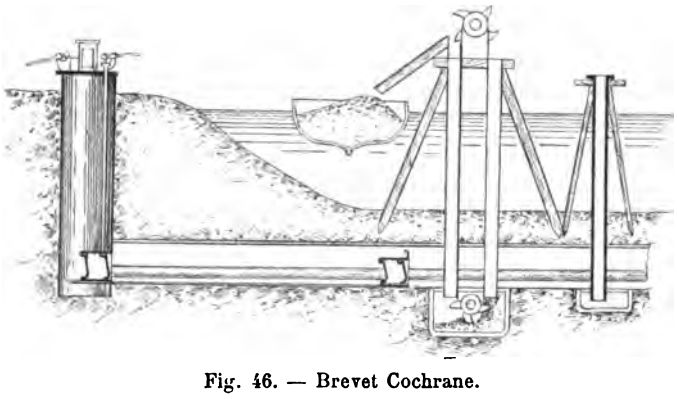


Fig. 46. — Brevet Cochrane.

« Quand le sol est ferme et sûr, on peut considérablement réduire « la pression de l'air. »

Le problème n'était pas si simple que le pensait Lord Cochrane et les accidents du souterrain de l'Hudson montreront que l'air comprimé sans le bouclier n'est qu'un palliatif insuffisant qui n'assure que bien rarement le succès et que, même avec le bouclier, il y a bien des accidents à redouter et des précautions à prendre. Il était toutefois intéressant de rappeler ce brevet antérieur de quelques années au premier emploi de l'air comprimé à Chalonnes-sur-Loire en France en 1839 et d'environ quarante ans au premier emploi de l'air comprimé dans une galerie horizontale, qui fut fait en 1879 au port d'Anvers par l'entrepreneur français bien connu, M. Hersent.

Avant de commencer l'examen du second travail exécuté par

la méthode du bouclier, il est indispensable de rappeler deux brevets pris par Peter William Barlow, qui ont été les premières esquisses de la méthode employée dans la construction du souterrain de la tour de Londres (*Tower Subway*). En 1863, cet ingénieur était occupé à diriger le fonçage des cylindres de fondation du pont de Lambeth. Il pensa qu'il serait tout aussi facile de faire progresser un cylindre horizontal pour la construction d'un souterrain. En conséquence, il prit en 1863 un brevet pour la construction des souterrains sous les rivières, dans les villes et en général dans tous les endroits où l'on ne peut sans graves dommages attaquer ni occuper la surface. Il prévoyait l'emploi d'un cylindre en fer ou en acier, d'un diamètre un peu plus grand que le souterrain à construire. L'arête d'avant du cylindre était amincie et les ouvriers déblayaient à l'intérieur ce qu'elle découpait. Le cylindre était avancé, dès que le déblai était terminé sur une longueur suffisante pour permettre la pose dans la partie arrière d'un anneau métallique ; cet anneau devait être assez fort pour constituer le revêtement permanent du souterrain. Il fallait avoir soin de ne donner à l'enveloppe métallique du cylindre mobile qu'une épaisseur aussi faible que possible, afin que le vide laissé entre l'extérieur des anneaux et le sol ne pût amener un tassement ultérieur qui se fît sentir à la surface.

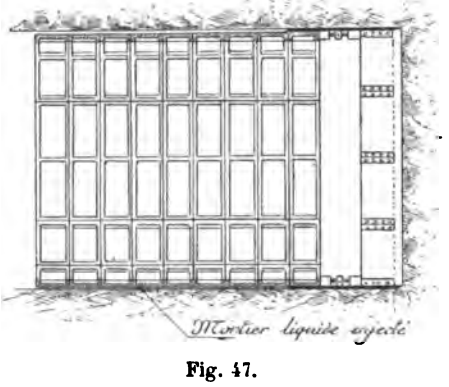


Fig. 47.
Coupe en long. — Premier brevet Barlow.

La figure 47 est une coupe longitudinale, dans laquelle sont représentés une série d'anneaux du revêtement du souterrain, assemblés avec des boulons, ainsi que le cylindre à l'intérieur et à l'abri duquel devait se faire le déblai.

Dans ce projet se retrouvaient les mêmes éléments de protection contre la poussée des terres tout autour de la fouille du souterrain, que dans le bouclier de Brunel. Il avait la grande supé-

riorité apparente d'être d'une seule pièce et par suite beaucoup plus simple ; mais rien ne prouve que ce cylindre, aux parois minces, sans aucun entretoisement, ne se fût pas écrasé et que les vis eussent suffi à le mouvoir. Pour qui connaît les difficultés contre lesquelles avait eu à lutter Brunel et les efforts auxquels avait été soumis son bouclier, il ne saurait y avoir de doute que celui de Barlow était trop faible. Le progrès n'est donc qu'apparent et tout au plus peut-on y voir l'indication de la voie dans laquelle il convenait de s'engager pour éviter les difficultés qu'avaient entraînées l'emploi d'un bouclier composé de pièces séparées. On ne saurait non plus considérer, comme une innovation, le recouvrement de la partie terminée du revêtement par l'extrémité arrière ou queue du bouclier ; Brunel avait déjà muni ses douves de plaques minces de recouvrement. Enfin l'enveloppe en fonte avait été imaginée par cet ingénieur dès 1818.

Si Barlow avait peu innové sur tous les points qui précèdent, il avait complètement négligé d'étudier le blindage du front d'attaque, objet de soins si méticuleux de la part de Brunel ; il se contentait en effet de dire, sans autre indication, que, si le terrain l'exigeait, on emploierait des planches de blindage. Il semble donc qu'on ne devrait voir dans le brevet dont il s'agit que l'expression d'un désir de simplification, sans étude bien sérieuse des moyens pratiques d'y arriver et que par suite on pourrait passer sans s'y arrêter sur un projet qui, heureusement pour son auteur, n'a pas été réalisé. Cependant on y trouve aussi une innovation importante, appelée plus tard à jouer un grand rôle ; Barlow émet en effet l'idée, si brillamment mise en pratique par Greathead, de remplir le vide laissé par l'avancement du bouclier, entre le terrain et la paroi extérieure du tunnel, avec du ciment liquide.

Quoi qu'il en soit, Barlow avait confiance en son idée et il n'hésita pas en 1867 à proposer un système qu'il appela « souterrains pour omnibus » composé de souterrains avec revêtement métallique de 8 pieds (2,44 m.) de diamètre. Dans ces tubes devaient circuler des omnibus en acier, à 12 places, mus à bras d'hommes sur une pente. Les points d'arrêt ne pouvaient par suite être qu'à un niveau fixe ; aussi, pour arriver à desservir les quartiers élevés, était-il prévu trois *séries de tubes à des niveaux*

différents et des ascenseurs pour faire passer omnibus et voyageurs de l'un à l'autre. On ne peut s'empêcher de faire un rapprochement entre ces tubes à omnibus et le réseau de tubes pour tramways électriques actuellement en cours d'exécution ; il est bien évident que les chemins de fer électriques souterrains de faible diamètre dérivent directement du projet à peine esquissé par Barlow. Ce fut dans le but d'établir se service que cet ingénieur demanda la concession du tunnel de la Tour de Londres, qui lui fut accordée par acte du Parlement en 1868.

Entre temps, Barlow avait cherché à perfectionner son engin d'exécution et pris un second brevet en 1868. Dans ce brevet, il déclarait vouloir mettre dans le cylindre de son premier projet

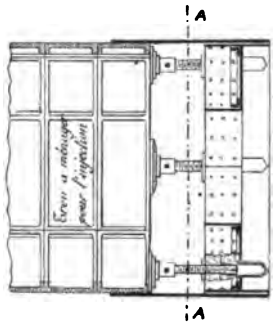


Fig. 48. — Coupe en long.
Deuxième brevet Barlow.

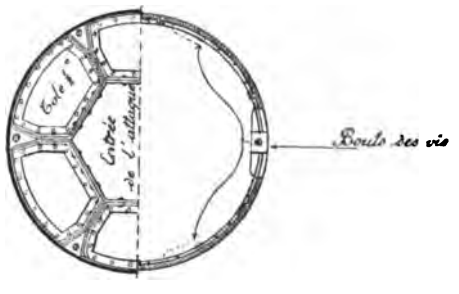


Fig. 49. — Coupes en travers.
Deuxième brevet Barlow.

une cloison transversale, avec une ouverture soit au milieu soit au-dessous de l'axe, qui pourrait être fermée en totalité ou en partie. De cette manière, en cas d'irruption d'eau, il serait encore possible de continuer à alimenter la partie supérieure du souterrain en air sous pression sans qu'il pût s'échapper, puisque la voûte formerait avec la partie haute de la cloison une véritable cloche à air. Aussitôt que le souterrain aurait été avancé suffisamment pour arrêter l'écoulement d'eau, rien n'empêcherait de laisser tomber la pression. L'idée était excellente et se retrouvera sous des formes diverses dans les plus beaux ouvrages modernes. Cependant, si la cloison renforçait un peu le cylindre, rien n'était fait pour remédier aux défauts du premier projet. Ce n'est toujours qu'un engin théorique, dessiné avec une inconscience absolue des dan-

gers auxquels un pareil travail est exposé et de la valeur des efforts contre lesquels il faut lutter. Ces réserves faites, et le côté pratique laissé de côté, voici en résumé les idées justes émises par Barlow : construire le bouclier tout d'une pièce, l'approprier à l'emploi de l'air comprimé déjà indiqué par Lord Cochrane en constituant un écran de sécurité de manière à maintenir toujours l'air dans la partie haute du souterrain ; enfin faire des injections de mortier dans les vides laissés par l'avancement du bouclier. L'usage et la lutte contre les difficultés se chargeront d'amener cette conception théorique à la forme pratique qu'elle gardera presque sans changement pendant plus de vingt ans.

Souterrain de la Tour de Londres. — Tout le monde ne partageait pas d'ailleurs la confiance de Barlow. Aussi, quand il eut obtenu l'autorisation du Parlement pour l'exécution du souterrain de Londres, aucun entrepreneur ne voulut se charger du travail. Un homme cependant comprit que l'idée était bonne, quoique la forme sous laquelle elle était présentée fût encore défectueuse ; ce fut un élève et aide de Barlow, un ingénieur, Greathead, qui entreprit le souterrain à ses risques et périls. C'est le grand honneur de cet ingénieur de s'être mis en avant au moment critique, pour démontrer, malgré l'incrédulité générale, la possibilité du procédé de construction repris par Barlow. S'il n'a rien inventé, il a su trouver les modifications nécessaires pour rendre pratique ce qui n'était encore que vaguement indiqué sur le papier. C'est dans ces conditions que Barlow et Greathead commencèrent en 1867 le souterrain de la Tour de Londres avec 7 pieds (2,13 m. de diamètre.

Le bouclier, qui fut définitivement employé, est le prototype de tous ceux construits ultérieurement par Greathead et dont les dessins sont donnés plus loin. Il était fort léger puisqu'il ne pesait que 2 1/2 t. Il se composait d'un cylindre en fer d'une épaisseur de un demi-pouce (0,0127 m.), ou plus exactement d'un tronc de cône dont les génératrices étaient faiblement inclinées sur l'axe, et dont le diamètre le plus grand était à l'avant. Greathead espérait ainsi réduire le frottement contre le terrain, pendant l'avancement du bouclier ; malheureusement cette idée très séduisante avait le grand

défaut de faire ouvrir une fouille trop large que ne remplissait qu'incomplètement le bouclier et par suite de déterminer à l'arrière des tassements et des mouvements de terrain; aussi a-t-elle été abandonnée, quoique la trace s'en retrouve dans le couteau mobile du bouclier du City and South London Railway.

A l'avant l'ancienne partie amincie du cylindre formant couteau était remplacée par un solide anneau en fonte avec arête circulaire, sage retour vers le tranchant des douves de Brunel. Les nombreux accidents, qui ont entraîné des avaries aux couteaux de bien des boucliers, ont montré combien il eût été imprudent de se fier à l'arête mince de Barlow. Cet anneau avait d'ailleurs aussi pour but de s'opposer aux déformations du cylindre sous l'effet de la pression des terres; il était à cet égard complété par la cloison, ou diaphragme, transversale dont Greathead modifia heureusement le tracé. Il la fit en tôle de fer et la boulonna à l'anneau de fonte; il changea également la forme de l'ouverture qui devint rectangulaire, ce qui permettait de l'encadrer de fortes pièces d'entretoisement, bien supérieures aux pièces rayonnantes de la cloison indiquée par Barlow. Cette modification de l'ouverture fut cependant accompagnée d'un changement très regrettable; au lieu de conserver au-dessus une partie pleine, constituant, comme il a été dit, un écran de sécurité, l'ouverture fut prolongée jusqu'à quelques pouces du toit. Cela permettait peut-être un passage plus facile aux hommes et aux déblais, et il est assez naturel que sur un assez faible diamètre les nécessités du service aient conduit à donner le plus de hauteur possible à l'ouverture; mais le précédent était dangereux et, appliqué un peu légèrement au souterrain sous la rivière Yarra, à Melbourne, il devait être en partie cause de la mort de plusieurs hommes.

En arrière il y avait six vérins à vis de 2 pouces et demi (0,064 m.) de diamètre, mus à bras d'hommes, qui prenaient leur point d'appui, pour faire avancer le bouclier, contre la partie déjà mise en place du revêtement du souterrain. Ces vérins pouvaient développer un effort total de 60 t. Le revêtement était en fonte et se composait d'anneaux de 18 pouces (0,467 m.) de largeur, formés de 3 segments et d'une clef. L'épaisseur du métal était de 7/8 de pouce (0,022 m.) et chaque segment était entouré

d'une nervure ou collet pour le boulonner avec les voisins. Ces nervures faisaient une saillie de 2 pouces 1/8 (0,054 m.) sur la paroi intérieure et, par suite, de 3 pouces sur la paroi extérieure. Le diamètre intérieur libre n'était par suite plus que de 6 pieds 6 pouces (1, 98 m.) au lieu de 7. Chacun des segments de cette enveloppe métallique pesait 4 cwt (203,208 kg.) et la clef 1 cwt (50,802 kg.), soit un poids total de 660,406 kg. par anneau et 1418 kg. par mètre courant. En comparaison des ouvrages construits plus tard, ce poids est bien au-dessous de la moyenne ; cela tient surtout au grand espacement et au peu de saillie des nervures. Les injections se faisaient avec une seringue à main et du mortier de chaux préparé dans un baquet.

Le souterrain de la tour a 1 350 pieds (411,47 m.) de longueur. En profil, il possède un point bas vers le milieu, relié par des rampes de 1/40 (0,025 m. par mètre) aux deux puits de rive, dont les profondeurs sont de 50 pieds (15,24 m.) et de 60 pieds (18,29 m.) avec un diamètre de 10 pieds (3,05 m.). Le puits de rive gauche, sur la place de Tower hill, put être commencé le 12 février 1869 ; le souterrain fut attaqué aussitôt après et arriva au point correspondant à la laisse des hautes eaux sur cette rive (Middlesex) le 26 mai. La traversée du lit de la rivière qui correspond à une longueur de 890 pieds (271,27 m.), fut achevée le 8 septembre. Il ne fallut donc que quinze semaines pour traverser la Tamise. La vitesse maxima fut de 9 pieds (2,74 m.) dans une journée de vingt-quatre heures, avec trois équipes d'ouvriers se relevant à huit heures d'intervalle. La vitesse moyenne ressort à 8 pieds 5 pouces 5/7 (2,58 m.). L'avancement a donc été très régulier. Le puits de rive droite (Surrey) put être attaqué le 15 octobre, en bordure de Tooley Street. A Noël 1869, moins de onze mois après le commencement des travaux, le gros œuvre était terminé. A ce moment les dépenses s'élevaient à 14 500 livres sterlings (362 500 fr.). Avec toutes les installations elles atteignirent 20 000 livres (500 000 fr.). Le fonçage des puits et l'exécution du tunnel proprement dit avaient été exécutés par Greathead, moyennant 10 000 livres, environ 150 000 fr., ce qui fait ressortir le prix du mètre courant à 607,60 fr. et celui du mètre cube à 170,07 fr., revêtement compris.

C'était un remarquable succès ; il est vrai que, par une heureuse

circonstance, le travail fut exceptionnellement facile. Le souterrain fut creusé dans l'argile compacte (London Clay) en pleine masse ; l'épaisseur entre le dessus de la fouille et le fond du lit de la rivière ne descendit pas au-dessous de 22 pieds (6,70 m.) et tout le travail put être exécuté sans employer l'air comprimé. Grâce à ce concours de circonstances, le bouclier, qui eût été certainement insuffisant pour un travail difficile, se trouva bien approprié au service assez aisé qu'il eut à faire ; il n'avait qu'à soutenir le poids

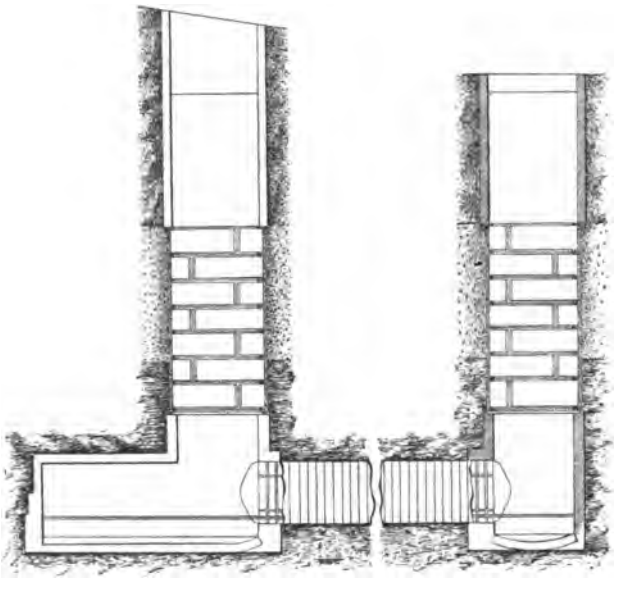


Fig. 50. — Coupe en long du souterrain de la Tour de Londres.

de l'argile sèche. On ne saurait trop s'en féliciter, car un échec eût certainement retardé et peut-être enrayé pour toujours le développement d'une méthode, qui devait rendre d'immenses services et permettre l'exécution de travaux sans cela inabordables.

Encouragé par ce premier succès, Barlow demanda et obtint en 1870 un acte du Parlement pour percer un second souterrain entre Southwark et la Cité, sous la Tamise, suivant un tracé presque identique à celui que suit le City and South London Railway exécuté ultérieurement. Une compagnie fut formée en 1871 pour l'exécution de ce souterrain par les mêmes procédés qu'à la Tour

de Londres, ainsi qu'il résulte des prospectus qui furent lancés. Toutefois le diamètre était prévu un peu plus grand, de 8 pieds (2,44 m.) sur une longueur de 1 200 yards (1 097,26 m.). Il devait y avoir des ascenseurs pour 20 voyageurs à chaque extrémité et des voitures remorquées par un câble au moyen de deux machines fixes. L'échec du projet d'omnibus souterrains pour lesquels le souterrain de la Tour avait été creusé fit, pour le moment du moins, renoncer à ce travail et en 1873 le Parlement adopta l'acte d'abandon de concession.

Projet Greathead. — A cette période se rattache immédiatement un projet de 1876 pour la construction d'un souterrain sous la Tamise, le North and South Woolwich Subway. Un bouclier et un grand nombre de segments en fonte furent construits sur les dessins de Greathead; mais les entrepreneurs durent, pour des motifs étrangers à ce travail, résilier leur contrat. Feu M. T.-A. Walker, qui ne croyait pas au bouclier, offrit d'exécuter le souterrain par les moyens ordinaires; mais, après avoir foncé un puits, il ne put arriver à construire le souterrain, même à l'air comprimé, et le travail fut abandonné. Il aurait été très intéressant de retrouver les dessins de ce bouclier que Greathead avait conçu pour la traversée des sables et des graviers et qui était bien différent de ceux qui ont été employés sur ses conseils dans l'argile compacte de Londres; malheureusement ces dessins faisaient partie des papiers personnels de cet ingénieur et depuis sa mort il a été impossible d'en avoir communication. On ne possède qu'un croquis et quelques indications données par lui dans une communication à la Société des Ingénieurs civils de Londres.

Dans ce croquis (fig. 51) la cloison verticale était beaucoup plus éloignée de l'arête du couteau; elle avait une forme courbe et ne possédait qu'une ouverture tout à fait en bas. En arrière, à la hauteur des presses hydrauliques destinées à l'avancement, il y avait deux autres cloisons destinées à servir de sas à air. Cette dernière disposition n'a été reproduite qu'au grand bouclier du souterrain de Blackwall. Celle de ces cloisons qui était le plus près du front d'attaque partait du bas et montait plus haut que l'ouverture du diaphragme d'avant de manière à empêcher tout échappement d'air,

tant que sa pression ne dépassait pas celle de l'eau ou toute rentrée d'eau tant que sa pression n'excédait pas celle de l'air sur la surface horizontale comprise entre la cloison et l'ouverture. Ce bouclier paraît avoir la plus grande analogie avec celui qui a été employé au tunnel sous la Mersey, dont il sera parlé plus loin.

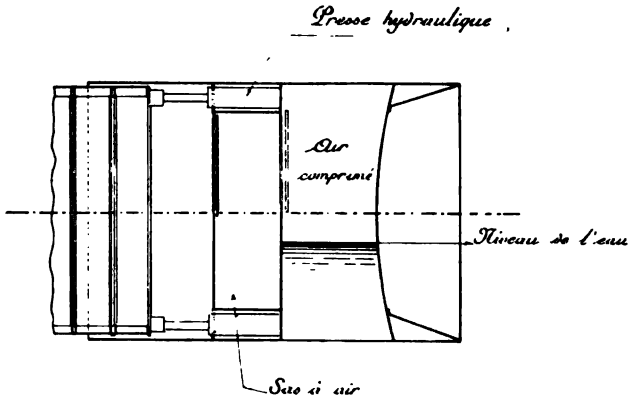


Fig. 51. — Projet Greathead.

Greathead avait en outre introduit quelques autres innovations, notamment une grue mécanique pour lever et mettre en place les segments en fonte du revêtement, appareil fort ingénieux qui se retrouvera dans divers souterrains. C'était donc un projet à tout point de vue remarquable et on ne peut que regretter vivement qu'il n'ait pas eu de suite et qu'il ait fallu de longues années pour voir mettre en pratique les idées excellentes qu'il contenait.

Boucliers américains Beach. — Pendant que ces tentatives se poursuivaient en Angleterre, les Américains essayaient de leur côté des applications un peu différentes de la méthode du bouclier. Il est fort probable que M. Beach, qui appliqua le premier bouclier, avait eu connaissance de ce qu'avait fait Greathead à Londres; mais soit qu'il eût des renseignements incomplets et qu'il ait dû s'en rapporter sur bien des points à sa propre inspiration, soit que ce fût un esprit réellement original, il créa un outil, peut-être critiquable à certains points de vue, mais qui, à d'autres, était un véritable pas en avant.

Son premier essai fut fait à New-York pour la construction du Broadway pneumatic underground Railway, sorte de chemin de fer souterrain, dans lequel les wagons devaient circuler dans un tube sous l'action de la pression de l'air. Le tube devait être construit complètement à sec, mais dans un sable très meuble, au-dessous des conduites d'eau et de gaz et des égouts, dans Broadway, une des rues de New-York où la circulation est la plus intense, et à proximité des fondations d'immeubles très importants et d'un

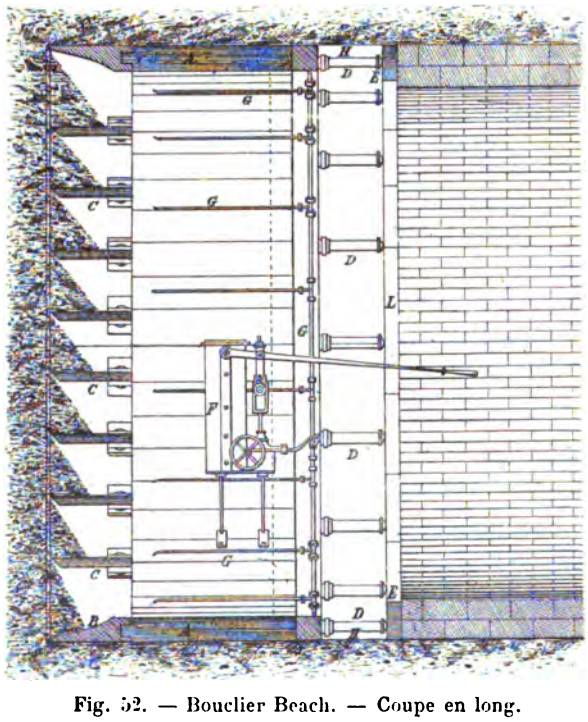


Fig. 52. — Bouclier Beach. — Coupe en long.

poids considérable. Le souterrain avait 8 pieds (2,44 m.) de diamètre intérieur et était construit en maçonnerie de briques et mortier de ciment.

Le bouclier dont il se servit se composait d'un tube A composé de pièces de bois, réunies par un cercle en fer contre lequel s'appuyaient les vérins D destinés à faire avancer le bouclier. A l'avant, se trouvait un lourd anneau en fer dont l'arête extérieure était amincie de façon à constituer un couteau. A l'intérieur de

l'anneau étaient placées une série de planches C horizontales également amincies en forme de lames tranchantes qui découpaient le sol en le maintenant. Les vérins s'appuyaient contre la maçonnerie exécutée par l'intermédiaire de bloc de bois E ; un tuyau G leur distribuait l'eau sous pression fournie par une pompe à bras F. Enfin un cylindre d'acier H à l'arrière, faisant corps avec le bouclier, servait d'abri pour l'exécution de la maçonnerie de briques, que l'on montait par anneaux de 16 pouces (0,41 m.). Cet appareil n'avait à travailler que dans un terrain sec, mais l'emplacement du tube exigeait que la fouille se fît très exactement sans laisser aucun vide pouvant donner lieu à des tassements. Au premier abord il paraît grossier, mais il faut reconnaître qu'il constitue la première application de l'emploi des vérins hydrauliques dont Brunel avait bien parlé, mais qui étaient restés à l'état de projet. Une innovation très personnelle est la division de la face en une série de tranches horizontales. Ce qui peut par contre lui être reproché, c'est une construction primitive et l'absence de toute pièce verticale de nature à empêcher la déformation.

A l'aide de la pompe à bras on pouvait, par l'intermédiaire des 16 vérins, exercer un effort de 126 t. contre la maçonnerie. Sous l'effet de cette pression, le couteau circulaire et les lames tranchantes pénétraient dans la terrain à une distance égale à la course des vérins hydrauliques ; et il n'y avait qu'à enlever la terre ainsi découpée et, après avoir rentré les vérins, à exécuter à l'abri de la queue un anneau de maçonnerie. Pour changer ou rectifier la direction, il suffisait de fermer les robinets commandant l'admission de l'eau dans un certain nombre de vérins du côté où il était nécessaire de ralentir la marche du bouclier. Tout l'effort se produisait de l'autre côté qui seul progressait. Cette simple opération permettait de régler la marche du bouclier avec une grande exactitude ; Beach avait d'ailleurs à faire à un terrain très favorable, dont la fouille se faisait très aisément sauf quelques blocs isolés, dans lesquels il fallait percer des trous de mine pour les briser.

Pour repérer et vérifier la position du bouclier, des trous étaient percés de bas en haut avec un tube de fer creux, qui se rallongeait par morceaux, jusqu'à la surface du pavage (fig. 53). Il suffi-

sait ensuite de descendre un fil à plomb pour avoir la position exacte de l'axe. Ce travail ne pouvait se faire que de nuit à cause de l'intensité de la circulation du jour.

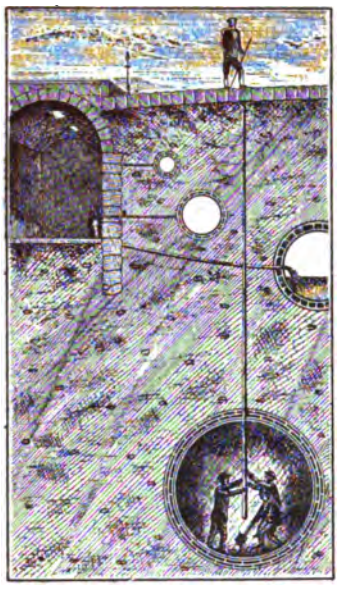


Fig. 53. — Vérification de l'alignement, système Beach.

La ligne comporte une station sous un trottoir de Warren Street où se trouvent une salle d'attente et les machines à air. Le wagon devait s'engager dans le tube par un portique en briques de 9 pieds de diamètre (2.74 m.). Après avoir décrit une courbe de 50 pieds (15,24 m.) de rayon, la ligne tubulaire se poursuit en ligne droite dans l'axe de Broadway, à 21 pieds 1/2 (6,55 m.) au-dessous de la rue, jusque près de Murray Street où elle se termine. Les promoteurs de l'affaire avaient l'intention de la prolonger ultérieurement, entre Battery et la rivière de Harlem.

Le 26 février 1870, ce premier tronçon fut ouvert au public, afin de lui faire apprécier les mérites de ce nouveau mode de transport. Mais le succès ne paraît pas avoir répondu à l'attente ; car il n'en a plus été reparlé.

Bouclier de Cincinnati. — Il a été fait cependant en 1871-1872 une seconde application du bouclier Beach, à Cincinnati (Ohio), pour la construction, sous la voie publique, d'un égout circulaire de 8 pieds (2,44 m.) de diamètre.

Un puits fut fait dans Sycamore street, près de Hunstreet, et, après être arrivé au niveau du radier de l'ouvrage à construire, deux boucliers furent descendus pour l'exécution du souterrain dans deux directions opposées. Ce dernier s'étend depuis Abigaïl street, sous Sycamore street, jusqu'à Court street, où il tourne par une courbe très raide pour suivre cette voie jusque au delà de Broadway. Dans ce parcours il passe sous deux canaux, le Miami Canal

et un de ses embranchements. La profondeur moyenne est d'environ 20 pieds (6,10 m.). Comme à New- York, le revêtement est fait en maçonnerie de briques.

Ce travail s'exécuta à sec dans d'excellentes conditions, sans apporter aucun trouble dans la circulation, si ce n'est l'entrée et la sortie des terres et des matériaux par le puits.

Cleveland lake tunnel. — Une dernière application du bouclier Beach fut faite dans la construction de la prise d'eau de la ville de Cleveland sous le lac Erié.

Les projets de ce travail furent faits en 1869 par l'ingénieur M. Whitelaw. Ils comportaient une prise d'eau par un puits dans le lac, réuni à la rive par un souterrain de 6 606 pieds (2 013 m.) de longueur. Ce souterrain avait 5 pieds (1,53 m.) de largeur et 5 pieds 2 pouces (1,59 m.) de hauteur avec une pente de 1 p. 100. Le puits du lac descendait à 90 pieds 2/10 (27,49 m.) tandis que sur la rive le souterrain était attaqué par un puits de 67 pieds 5/10 (20,57 m.) de profondeur.

Le travail fut adjugé au prix de 18 dollars (90 fr.) par pied. Il se poursuivit d'abord très régulièrement par des procédés analogues à ceux qui ont réussi pour beaucoup de souterrains de prise d'eau sous les lacs (Chicago, Millwaukee, etc.). Mais dans la partie exécutée en partant du puits du lac, le souterrain rencontra une argile très mauvaise dans laquelle il fut impossible d'avancer. Il fallut condamner provisoirement la galerie par une cloison en bois.

Les entrepreneurs firent alors construire un bouclier de 6 pieds 1/2 (1,98 m.) de diamètre intérieur, avec de fortes tôles à chaudière, renforcées par deux anneaux de fonte carrés de 4 pouces (0,10 m.). Ces anneaux étaient élargis à l'emplacement des presses hydrauliques. Le constructeur avait prévu l'installation de cloisons verticales et de planches horizontales de 9 pouces (0,23 m.) d'épaisseur, de manière à diviser le front d'attaque en cellules de 18 pouces (0,46 m.) de côté; mais les entrepreneurs crurent pouvoir se dispenser de les mettre en place quand ils eurent reconnu que deux planches suffisaient pour ralentir l'écoulement de l'argile. L'arrière du bouclier était conservé lisse sur 2 pieds

(0,61 m.), de manière à pouvoir glisser sur la maçonnerie qui était construite à l'intérieur par anneaux de 16 pouces (0,41 m.); la queue du bouclier recouvrait par suite toujours la maçonnerie d'au moins 8 pouces (0,20 m.).

Malgré tous les soins apportés à son exécution, il se produisait toujours des lézardes dans la maçonnerie à l'avancement du bouclier. Il est vrai qu'elles étaient toutes transversales et correspondaient aux reprises de maçonnerie et qu'il y avait lieu de les attribuer à ce que le souterrain était assis au milieu d'une couche de 30 pieds (9,14 m.) d'argile absolument molle. Il fallut placer sur ces fissures, à l'intérieur de la maçonnerie, des anneaux de fonte de 12 pouces (0, 305 m.) de largeur et un pouce (0, 025 m.) d'épaisseur, posés par segments à bain de mortier de ciment et clavés avec une clef bien étanche.

Le premier essai de montage du bouclier eut lieu à 18 pieds (5,49 m.) en arrière de l'extrémité provisoirement barrée du souterrain. Mais l'opération ne put réussir. Dès que l'argile eut été mise à nu par la démolition de la maçonnerie de briques, elle se mit à couler; il fallut battre en retraite et fermer le souterrain par une nouvelle cloison. L'opération fut recommencée à 12 pieds (3,66 m.) plus en arrière, dans un emplacement où l'argile était assez consistante pour permettre le montage du bouclier. Dans la traversée des 30 premiers pieds (9,14 m.), l'enlèvement de la maçonnerie faite antérieurement et des deux cloisons fut très laborieux; et fit perdre plus d'un mois. Au-delà le travail alla plus vite; la longgueur construite avec le bouclier fut de 140 pieds (42, 67 m). Au début, les entrepreneurs voulurent se servir de simples vérins à vis; mais l'avancement était si lent qu'il fallut leur substituer des presses hydrauliques pouvant développer ensemble un effort de 135 t. Malgré cette force, ils eurent par moment beaucoup de peine à faire avancer le bouclier et à le maintenir en ligne; il dévia vers la gauche de 2° 46′ et, en traversant l'argile molle, il baissa sensiblement, de sorte que les maçonneries se trouvaient implantées trop bas. La pression de l'argile molle sur le bouclier était d'environ 4 t. par pied carré (39060 kg. par mètre carré). Sous cette pression énorme, les anneaux de fer cassèrent en plusieurs endroits et le cylindre s'aplatit de 4 pouces (0, 10 m.).

Les Américains ne voulurent pas tenir compte de la difficulté du travail et des imperfections faciles à voir et à corriger du bouclier. Il est bien certain que, si les constructeurs avaient mis les divisions verticales comme elles étaient prévues, le bouclier ne se serait pas déformé; et il est fort probable qu'en employant des injections de mortier les fissures de la maçonnerie auraient été évitées. Enfin, laisser le front d'attaque ouvert dans un aussi mauvais sol, c'était s'exposer à enlever un cube supérieur au vide, ce qui certainement explique les tassements qui se sont produits. Les ingénieurs, et surtout M. Chesborough ne se souvinrent que des inconvénients, et après quelques années d'engouement ils abandonnèrent le bouclier qui, suivant eux, était impuissant à supporter la poussée des terres et impossible à diriger. Ils persistèrent dans cette erreur, et ce n'est qu'après de longues années de lutte et des échecs coûteux qu'à la rivière de l'Hudson et à la rivière Saint-Clair ils consentirent à employer un bouclier. Encore, sur le premier point, fallut-il qu'il fût réimporté par une compagnie anglaise, comme il sera expliqué plus loin.

CHAPITRE III

CHEMIN DE FER ÉLECTRIQUE DE LA CITÉ A STOCKWELL

CITY AND SOUTH LONDON RAILWAY

(1886-1890)

Exposé. — Les projets de M. Barlow pour établir des omnibus souterrains, sous la Tamise et dans Londres, remorqués soit à bras d'hommes, soit par des câbles et des machines fixes, ont été exposés dans le chapitre précédent. La ligne, qui va être décrite, devait également dans l'esprit des promoteurs être un tramway à câble ; la traction électrique n'y a été adoptée qu'en cours d'exécution ; elle est donc la suite naturelle des essais poursuivis à la Tour de Londres et à Woolwich.

Les débuts de l'affaire furent laborieux. Il y eut beaucoup d'hésitations et d'oppositions, quand il s'agit d'obtenir les autorisations et de constituer la Compagnie. Un premier acte du Parlement de 1884 autorisa la construction du City of London and Southwark subway entre King William Street dans la cité et Elephant and Castle dans la paroisse de Newington. Ce ne fut qu'en 1886 que M. C.-G. Mott, après avoir examiné le tunnel de la Tour de Londres et reconnu l'avantage du procédé d'exécution présenté par Greathead et recommandé par sir Benjamin Baker et sir John Fowler, accepta la présidence de la Compagnie avec Edmond Gabbutt comme entrepreneur. Deux actes successifs du Parlement, dont le premier date de 1887, autorisèrent à prolonger la ligne vers le sud, d'abord jusqu'à Stockwell, puis jusqu'à Clapham Common ; c'est à ce moment qu'elle prit son nom actuel. Enfin en 1893, à la suite d'une discussion dont il sera parlé à propos du Waterloo and City Railway, le prolongement vers le nord à tra-

vers la Cité jusqu'à Islington, figura dans l'acte autorisant la création d'un véritable réseau de chemins de fer électriques souterrains du même type.

Le premier travail entrepris fut la construction des deux souterrains conjugués sous la Tamise ; il était indispensable, en effet, de dissiper la méfiance générale à ce sujet et de faire taire ceux qui prétendaient que tout le capital de la société ne suffirait pas à terminer cette partie du travail. Un échafaudage provisoire fut construit dans le lit même de la Tamise, pour fonder un puits près de Old Swan Pier et du Pont de Londres. Le premier souterrain fut attaqué en octobre 1886 et le second en mars 1887 ; en juin de la même année, la traversée de la rivière était complètement terminée. Les attaques aux diverses stations furent commencées en juillet 1887, à l'église Saint-Georges, Borough ; à la fin de la même année, à Elephant and Castle; en mars 1888 à la Cité, et à peu près à la même époque au parc de Kennington, pour le prolongement vers Stockwell. Les travaux d'installation des ascenseurs hydrauliques pour l'accès aux stations furent commencés par MM. W.-G. Armstrong, Mitchell and C° à la fin de 1888. Les installations électriques furent entreprises en 1889 par MM. Mather et Platt. Les premiers essais purent se faire en février 1890 et l'inauguration solennelle eut lieu le 4 novembre 1890, en présence de S. A. le prince de Galles. Ce fut le succès de cette entreprise qui décida quelques années plus tard le Parlement à autoriser le réseau actuellement en cours d'exécution.

Tracé. Profils. — La ligne part de King William street qu'elle traverse immédiatement à angle droit, près du Monument, à 70 pieds (21,34 m.) de profondeur au-dessous de la rue, passe sous Arthur street et Swan Lane jusqu'à la Tamise sous laquelle elle se trouve, à une profondeur maxima de 73 pieds (22,25 m.) au-dessous du niveau des hautes eaux. Le chemin de fer continue sous les bâtiments de Hibernian Warf et sous la rampe d'accès côté Sud au Pont de Londres et passe ensuite sous les voies suivantes : High street, Borough, Blackman street, Newington Causeway, Newington Butts, Kennington Park Road, et Clapham Road, jusqu'à Stockwell où la ligne s'arrête actuellement à la

jonction des routes de South Lambeth et de Stockwell. Excepté à son passage sous la Tamise et sous une propriété privée sur la

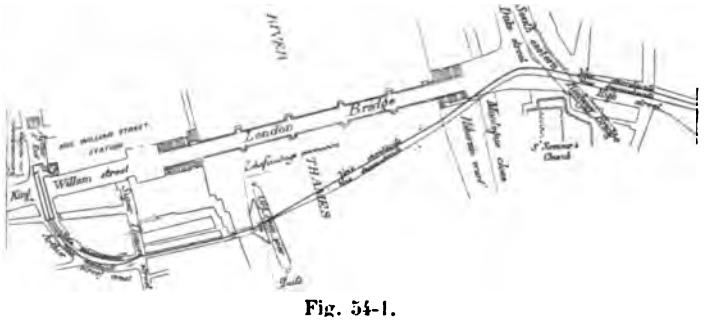


Fig. 54-1.

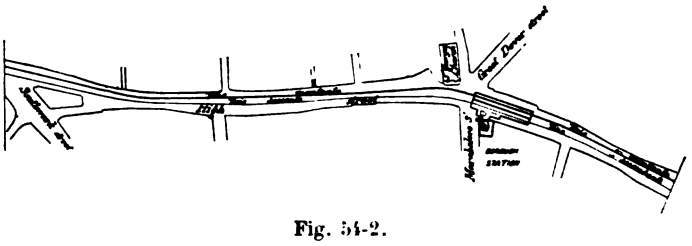


Fig. 54-2.

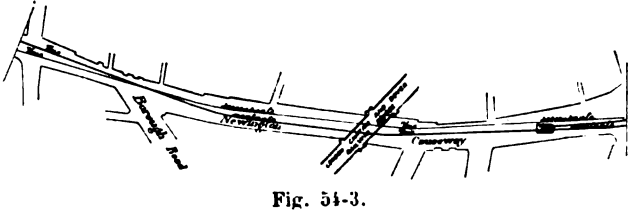


Fig. 54-3.

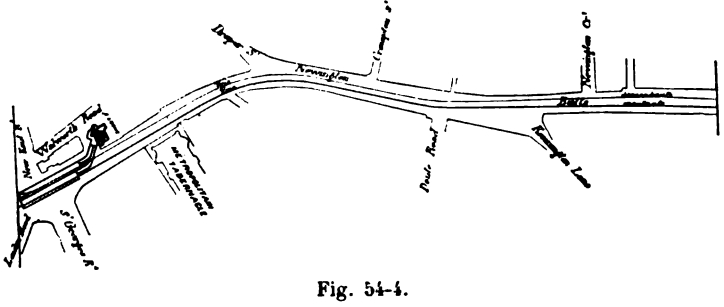


Fig. 54-4.

Fig. 54-1-2-3-4. — Plan.

rive sud, la ligne est sur tout son parcours établie sous des voies publiques. La figure 54 donne le détail du tracé et fait voir qu'il

traverse deux lignes de chemin de fer, le South-Eastern Railway, et le London Chatham and Dover Railway.

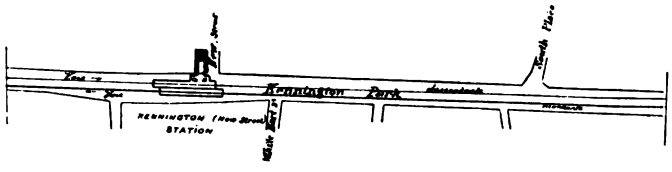


Fig. 54-5.

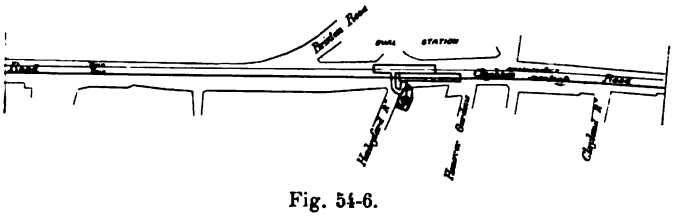


Fig. 54-6.

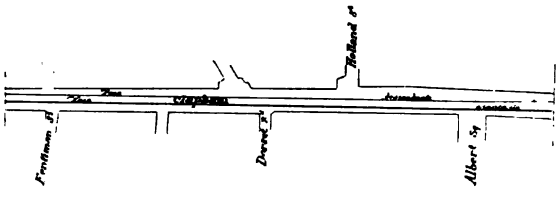


Fig. 54-7.

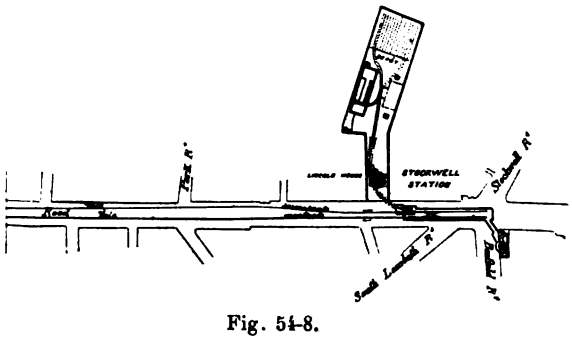


Fig. 54-8.

Fig. 54-5-6-7-8. — Plan. Suite.

Sur le profil en long (fig. 55) et le plan, sont indiquées les courbes, pentes et rampes des deux voies, qui sont établies partout, sauf aux terminus, dans deux souterrains distincts. Les figures 56

et 57 à plus grande échelle permettent de se rendre compte des

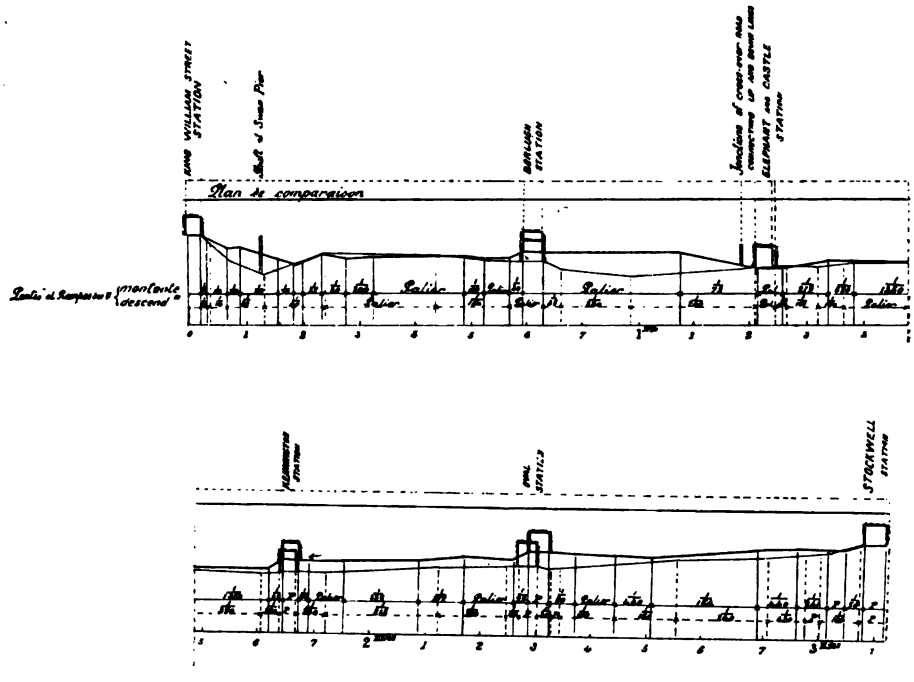


Fig. 55. — Profil en long.

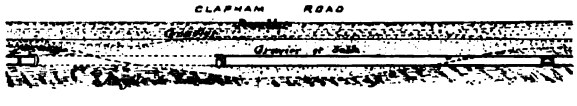


Fig. 56. — Profil sous Clapham Road.

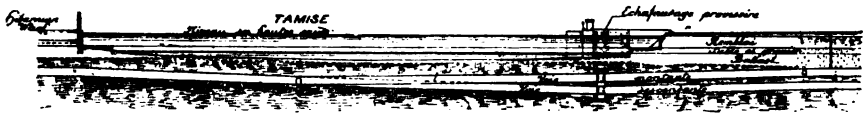


Fig. 57. — Profil sous la Tamise.

conditions dans lesquelles la ligne traverse les terrains aquifères

sous Clapham Road et de la nature des couches rencontrées sous la Tamise.

Souterrain double. — L'emploi de deux souterrains distincts a été justifié par d'assez nombreux motifs. On peut écarter comme contestable l'idée que la ventilation serait mieux assurée par les trains qui circuleraient toujours dans le même sens. Mais on doit reconnaître à cette solution un avantage considérable ; au passage sous la ruelle étroite de Swan Lane, il eût été impossible de placer un souterrain à deux voies sans empiéter sous les immeubles en bordure et la valeur des propriétés est telle qu'il ne fallait pas songer à acquérir ou à indemniser les propriétaires; les deux souterrains ont pu, au contraire, être placés comme l'indique la figure 58 l'un au-dessus de l'autre, sans sortir des limites de la voie publique.

Fig. 58.
Coupe Sous. Swan Lane.

Les accès aux stations peuvent se faire très facilement, avec les deux souterrains placés à des niveaux différents, sans recourir à des traversées de voie dangereuses ou obliger les voyageurs à franchir les voies au moyen de passages desservis par des escaliers fatigants et peu commodes. En cas de raccordements de lignes, ils permettent d'éviter les croisements à niveau sans recourir à des passages inférieurs ou supérieurs coûteux et d'une exécution délicate. Il est plus facile et moins dangereux d'exécuter des souterrains de petite section dans les mauvais sols ou au passage sous les ouvrages existant, égouts, chemins de fer, etc. Enfin tout au moins avec le revêtement en fonte, les deux souterrains de petite section coûtent moins cher qu'un grand. A ces raisons de valeurs diverses, qu'il n'y a pas lieu de discuter ici, venait s'ajouter pour les constructeurs la possibilité de créer un point bas entre chaque station de manière à faciliter les démarrages et les arrêts.

Courbes, pentes et rampes. — La ligne, ayant été primitivement construite pour un tramway funiculaire, a pu être tracée

avec des courbes, pentes et rampes plus prononcées qu'il n'eût été possible de le faire avec un autre mode de traction. Le plus faible rayon de courbe sous Arthur Street est de 140 pieds (42,67 m.) ; il se trouve en outre plusieurs courbes de 190 et 200 pieds (58,91 m. et 60,95 m.) de rayon. La pente la plus forte est de 1/14 (0,071 m. par mètre), au point où les lignes viennent se placer l'une au-dessous de l'autre ; généralement il existe à la sortie des stations une pente de 1/30 (0,033 m. par mètre), en vue de faciliter le démarrage et de pouvoir acquérir rapidement le maximum de vitesse sans une dépense de force exagérée. La plus forte rampe se trouve sous Swan Lane au point où les deux voies se superposent : elle atteint 1/40 (0,025 m. par mètre). En général, les rampes, qui suivent la pente rapide créée artificiellement à la sortie des stations, sont faibles. Cette idée de créer une fosse entre chaque station était rationnelle avec la traction par câble, mais a moins d'intérêt avec la traction électrique, et paraît avoir été abandonnée dans les lignes actuellement en construction.

Profils en travers. — Les souterrains sont circulaires et ont, dans la partie construite la première, de la cité à Elephant and Castle, 10 pieds 2 pouces (3,11 m.) de diamètre intérieur ; ce diamètre a été porté sur le reste du parcours à 10 pieds 6 pouces (3,20 m.). Sur la longueur totale de 3 miles 1 furlong 140 pieds (5071,78 m.), il y a donc environ 1 mile 2 furlongs (2011,64 m.) de souterrains du plus petit des deux types.

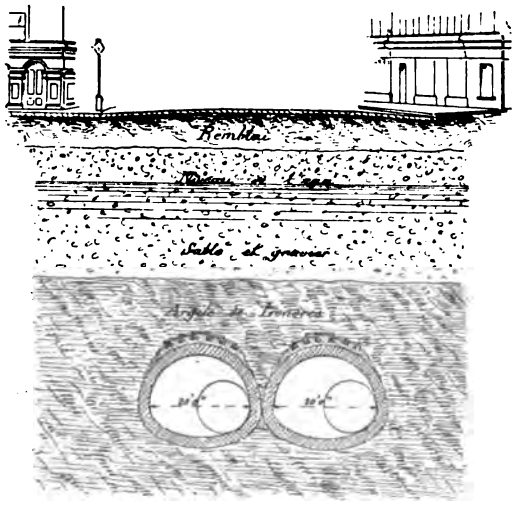


Fig. 59.
Coupe de la station d'Elephant and Castle.

A chaque station intermédiaire, sur la longueur du quai, les

deux souterrains ont une largeur de 20 pieds (6,10 m.) et une hauteur de 16 pieds (4,88 m.). Les quais ont environ 3,30 m. de largeur et 100 pieds (30,48 m.) de longueur. Aux deux stations terminus, il y a un souterrain unique de 26 pieds (7,92 m.) de largeur sur 20 pieds (6,10 m.) de hauteur ; mais à la Cité, il n'y a qu'une voie avec deux quais, l'une pour le départ et l'autre pour l'arrivée, tandis qu'à Stockwell, il n'y a qu'un quai central entre les deux voies. Cette dernière gare est aussi reliée par un souterrain spécial à forte rampe de 1 pouce

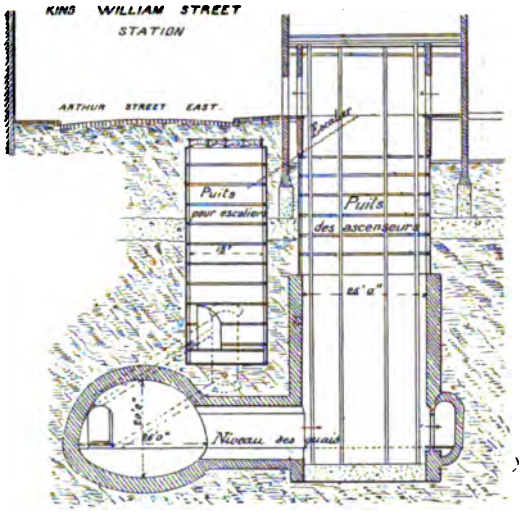


Fig. 60. — Coupe de la station de la Cité.

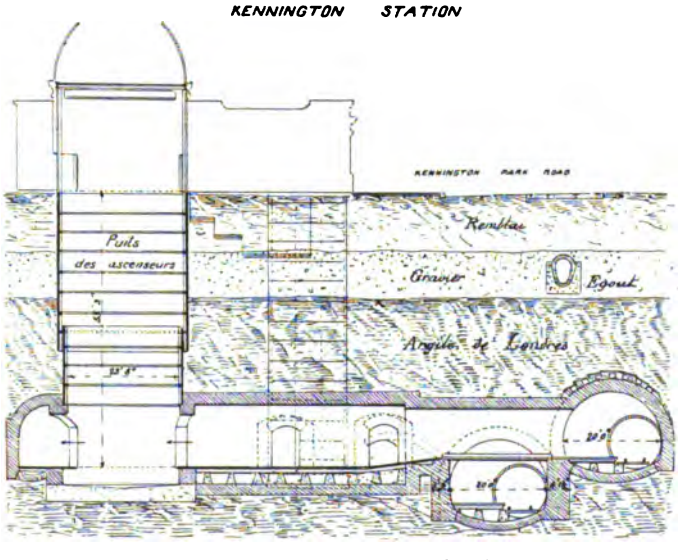


Fig. 61. — Coupe de la station Kennington.

3 1/2 (0,286 m. par mètre) au dépôt du matériel. Les figures 59,

60, 61 et 62 permettent de se rendre compte des dispositions des stations. L'établissement des deux quais à des niveaux différents, supprime presque tout escalier pour se rendre des ascenseurs aux quais. Il n'y a d'exception qu'à Elephant and Castle où les deux voies sont au même niveau, de manière à permettre par une bretelle le passage des trains de l'une à l'autre voie.

En établissant partout les voies à une grande profondeur au-dessous du niveau de la rue, les constructeurs ont eu surtout pour but de les placer dans l'argile compacte de Londres, au-dessous

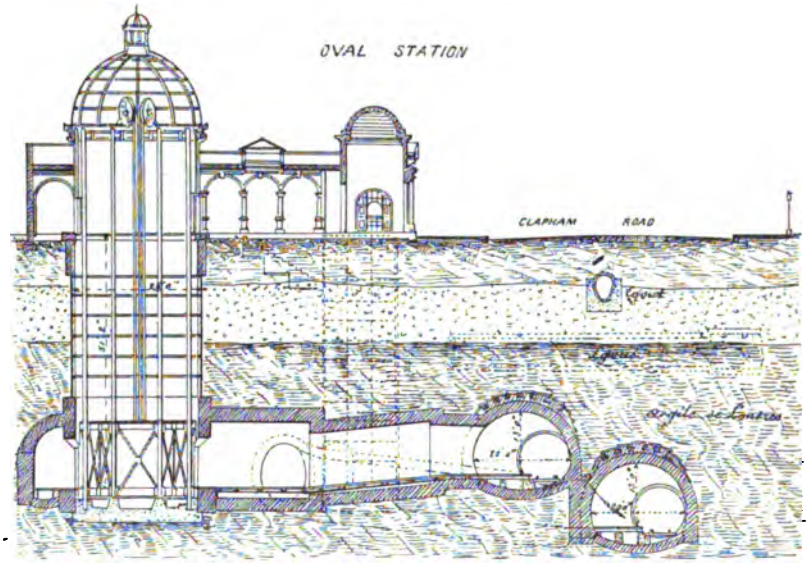


Fig. 62. — Coupe de la station d'Oval.

des terrains aquifères, de supprimer les frais de déplacement des égouts et de toutes les conduites qui se trouvent sous la voie publique, d'éviter ainsi toute fouille à la surface et tout travail de reprise en sous-œuvre. Il en résultait une économie de construction considérable, mais il devenait nécessaire de munir les stations d'ascenseurs. Il a été à cet effet construit à chaque station un puits de 25 pieds (7,62 m.) de diamètre dans lequel se trouvent deux ascenseurs demi-circulaires indépendants, du type à suspension par câble, pouvant enlever 50 à 60 voyageurs. Un puits plus petit de 15 pieds (4,57 m.) de diamètre dans chaque station con-

tient un escalier circulaire qui peut servir en cas d'accident ou de réparations. Ces ascenseurs sont actionnés par l'eau, sous une pression de 1 200 livres par pouce carré (84 kg. par cm²). Les tuyaux d'alimentation et d'échappement sont placés sur des con-

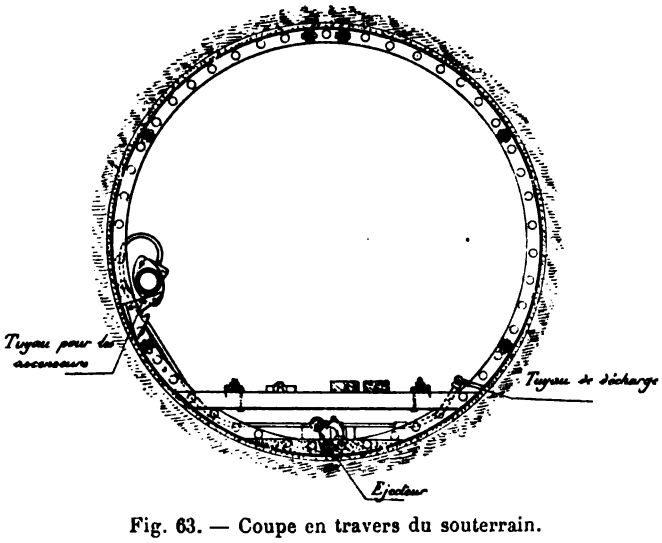


Fig. 63. — Coupe en travers du souterrain.

soles dans les souterrains (fig. 63) ; ils sont branchés sur deux accumulateurs, l'un au milieu de la ligne, dans le puits pour les escaliers à Elephant and Castle et l'autre au dépôt, où se trouvent trois machines de compression indépendantes.

Voie. — La voie est établie sans ballast de manière à éviter la poussière désagréable pour les voyageurs et cause d'usure rapide des machines et en particulier des moteurs électriques. Elle se

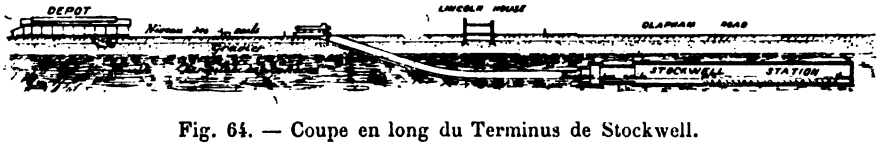


Fig. 64. — Coupe en long du Terminus de Stockwell.

compose de rails Vignole pesant 60 livres par yard (29,76 kg. par mètre courant) reposant sur des traverses de 12 pouces (0,30 m.) de largeur sur 6 (0,15 m.) d'épaisseur fixées directement au revê-

tement métallique. Cette disposition a l'inconvénient d'être très sonore.

L'assainissement des galeries est assurée au moyen de petits éjecteurs hydrauliques, alimentés sur la conduite des ascenseurs, qui refoulent l'eau par un tuyau de 2 pouces (0,05 m.) dans les égouts.

L'installation du dépôt étant faite à ciel ouvert dans un terrain réuni à la ligne par le petit souterrain dont il a été parlé à propos de la station de Stockwell, et visible sur la coupe (fig. 64), il n'y a pas lieu de s'y arrêter ici. Il en est de même du matériel roulant et de l'exploitation qui sont étrangers au sujet de cet ouvrage.

Sondages. – De fréquents sondages généralement de 3 pouces (0,076 m.) de diamètre révélèrent que sauf sur 50 m. environ à la station de la Cité, la ligne était constamment au-dessous d'une nappe d'eau dont les mouvements de montée et de descente coïncidaient avec la marée et qui par suite était en communication directe avec la Tamise.

Puits. — La compagnie avait été autorisée à ouvrir des puits temporaires sur les voies publiques pour la construction, mais elle n'eut pas besoin d'utiliser cette ressource onéreuse et tout le travail se fit par un puits temporaire dans le lit de la Tamise et par les puits de 25 pieds destinés à recevoir les ascenseurs dans les stations.

Le puits dans la rivière avait l'avantage de permettre une rapide évacuation des déblais et de ne pas nécessiter d'acquisitions de terrain. Il fut établi en dehors des berges et estacades, au milieu d'un échafaudage monté sur des pieux battus en rivière à travers le sable, jusqu'à l'argile. Cet échafaudage avait 100 pieds (30,48 m.) de longueur sur 35 (10,67 m.) de largeur. Le puits fut fait à l'aide d'anneaux en fonte, boulonnés les uns aux autres, de 13 pieds (3,96 m.) de diamètre; il fut foncé à niveau plein en draguant à l'intérieur. Pour maintenir l'eau au même niveau à l'intérieur du puits que dans la rivière, malgré les variations allant jusqu'à 19 pieds (5,79 m.) dues à la marée, et éviter les affouillements qui se seraient produits si l'eau avait cherché à se faire jour le long des parois du puits, une ouverture fut constamment maintenue, à

la hauteur du niveau des basses eaux; elle ne fut fermée que lorsque le puits, après avoir traversé les sables et graviers, eût été fortement ancré dans l'argile. A partir de ce moment il fut mis à sec et la partie inférieure achevée par reprise en sous-œuvre en maçonnerie de briques et ciment, en ménageant les quatre ouvertures pour les deux souterrains (fig. 57). La profondeur totale, y compris un puisard de 9 pieds (2,74 m.) de profondeur, fut de 82 pieds (24,99 m.) au-dessous du niveau des hautes eaux. Ultérieurement le puits fut dérasé au niveau du fond du lit de la rivière après avoir été fermé par un plafond dont l'étanchéité est assurée au moyen d'un corroi d'argile, d'une chappe d'asphalte et enfin d'une couche de béton.

Les puits de 25 pieds des stations ont été exécutés par un procédé analogue. La partie avec revêtement métallique, reposant sur un couteau était descendu jusqu'à 3 ou 4 pieds (0,91 m. à 1,22 m.) dans l'argile, en la chargeant avec les segments du revêtement métallique des souterrains. Les puits étaient ensuite repris en sous-œuvre avec de la maçonnerie de briques et ciment par anneaux de 6 pieds (1,83 m.) de hauteur. En bas, pour l'accès aux ascenseurs, aux deux extrémités d'un même diamètre, furent ménagées deux ouvertures, réunies plus tard par une galerie percée tout autour et à l'extérieur du puits. En ayant soin de bien serrer les joints avant d'atteindre le niveau de l'eau, l'étanchéité était complète, quoique aucun des anneaux n'eût été raboté ni tourné. D'ailleurs les revêtements des puits sont restés à nu et on a utilisé les collets des joints pour l'installation des ascenseurs.

Les puits de 15 pieds pour escaliers dans les stations furent exécutés de la même façon. Seulement à la reprise en sous-œuvre, la maçonnerie de briques fut remplacée par des anneaux en fonte, en ayant soin, dans les vides qui pouvaient rester derrière le revêtement, d'injecter du mortier de chaux par le procédé qui sera indiqué plus loin. Ce mode de travail avait l'avantage d'être beaucoup plus rapide et moins dispendieux que la maçonnerie, en raison de la diminution de largeur de la fouille. Il permet d'obtenir des puits de largeur uniforme à toute profondeur et sans provoquer aucun mouvement du terrain.

Le puits de 25 pieds de la station de la Cité fut foncé jusqu'à

75 pieds dans le remblai, le gravier et l'argile, à l'intérieur d'une maison, dont les fondations touchaient presque la paroi du puits, sans causer aucun dommage à cet important immeuble.

Marche du travail. — La partie du souterrain supérieur dirigée vers le sud en partant du puits provisoire en rivière fut attaquée la première. Le 1er octobre 1886, le bouclier était descendu sur une plate-forme et prêt à avancer. Le travail alla d'abord très lentement, et l'avancement ne fut dans les deux premières semaines que de 23 pieds (7,01 m.). Mais quand les ouvriers eurent acquis un peu d'expérience et que quelques perfectionnements eurent été apportés, la vitesse augmenta et atteignit 16 pieds (4,88 m.) par jour et en moyenne 80 pieds (24,38 m.) par semaine. Ce souterrain atteignit la rive sud en février 1887 et fut continué sous Hibernian Warf et la rampe d'accès au pont, dans la direction de Borough.

Le second souterrain fut commencé immédiatement dans la même direction, en partant du puits, et atteignit la rive sud en 14 semaines.

Le souterrain supérieur fut pendant ce temps repris vers le nord, mais à 60 yards (54,86 m.) de la rive, l'argile fut crevée et l'eau se fit jour avec abondance. Il fallut fermer le bouclier et établir un sas à air. Le travail fut repris à l'air comprimé; au bout de 50 yards (45,72 m.) l'argile compacte fut retrouvée. Après avoir scellé les joints du revêtement avec du ciment de fer, il fut possible de laisser tomber la pression et le souterrain put être achevé à l'air libre. Pendant ce travail, l'air se dégageait assez loin dans la rivière entre Cannon Street et London Bridge et la pression dans le souterrain s'égalisait automatiquement avec celle due au niveau de l'eau dans la rivière, suivant le jeu des marées.

Les deux souterrains furent alors menés simultanément vers la Cité en maintenant celui du dessus à environ 100 m. en avance; le passage dans la courbe de 140 pieds (42,67 m.) de rayon se fit sans difficulté. Dès que le premier souterrain fut achevé, le puits de la station fut attaqué. En vue de diminuer les transports de terre sur la voie publique, le grand puits ne fut fait qu'après l'ouverture d'un puits boisé de 4 pieds (1,22 m.) de côté, par lequel furent

descendus tous les déblais du grand puits. Ils étaient ensuite transportés avec ceux de la station, dans le souterrain, jusqu'au puits provisoire dans la rivière.

Aussitôt après l'achèvement des souterrains sous la rivière, les terrains furent acquis pour les stations de Borough et d'Elephant and Castle. Le fonçage des puits de 25 pieds et l'exécution d'une galerie perpendiculaire au tracé permit de monter et mettre en place, à chacune des stations, quatre boucliers pour exécuter les deux souterrains dans les directions nord et sud. A ce moment la compagnie avait obtenu l'autorisation du prolongement vers Stockwell. Le travail fut confié à MM. Walter Scott and C°, qui l'attaquèrent en août 1887, avec trois chantiers à Kennington, Oval et Stockwell, pendant l'achèvement de la section de la Cité.

Stations. — Dans les stations les souterrains étaient élargis. La maçonnerie de briques était exécutée avec une épaisseur de 2 pieds 3 pouces (0,69 m.) dans les stations intermédiaires et de 3 pieds (0,91 m.) dans les stations terminus. Lorsque les deux souterrains n'étaient pas au même niveau, celui qui était le plus bas était fait le premier et, dans la construction du second, une de ses parois était appuyée sur celle de la galerie inférieure (fig. 61 et 62). Un grand soin fut apporté à l'exécution de ces souterrains, pour lesquels il fut fait usage de boisages très forts. Le travail se fit d'abord par longueur de 5 pieds (1,52 m.), mais l'expérience montra qu'en prenant 9 pieds (2,74 m.) à la fois, les boisages pouvaient s'appuyer sur du terrain qui n'avait pas encore été bouleversé. Malgré toutes les précautions, il y eut quelques mouvements dans le sol et à la surface; à la fin cependant dans les chantiers de MM. Walter Scott and C°, ils se réduisirent à peu de chose. Toutes les stations ont été faites dans l'argile de Londres, sauf à Kennington, où sur une petite longueur le radier a été fait dans le sable et où il a été impossible d'éviter l'eau.

Alignement. — En raison de l'espacement des puits, il fallut apporter les plus grands soins pour la direction des ouvrages. Entre le puits de Kennington et celui d'Elephant and Castle, sur 900 pieds (274,32 m.) malgré les courbes, il n'y eut qu'un écart de

5/8 de pouce (16 mm.), et entre l'Oval et Kennington l'erreur fut encore plus faible. Ces résultats font honneur aux ingénieurs MM. Basil Mott et David Hay.

Pour obtenir une aussi grande précision, ils commencèrent par reporter le tracé à la surface, en implantant des repères et en mesurant avec le plus grand soin les distances et les angles. Ce travail devait être exécuté de nuit et les visées se faisaient sur une feuille de papier de soie quadrillé placée devant une lampe électrique. Dès que les puits étaient foncés et la galerie transversale, percée, l'axe de cette galerie était reporté à la surface pour déterminer sa longueur et l'angle qu'il faisait avec l'axe du souterrain. Le théodolite était alors replacé en bas à la distance exacte et l'axe du tunnel implanté avec l'angle qui avait été relevé. Cette opération se recommençait deux et trois fois, jusqu'à ce que la longueur exécutée pût donner une base certaine. Les points étaient donnés par une entaille tracée sur un morceau de fer fixé dans un coin en bois dur, qui avait été enfoncé entre les anneaux au sommet du souterrain. En visant un fil à plomb fixé sur le repère, quand l'atmosphère était clair, il était facile de découvrir la plus petite erreur. Mais comme les visées avec le théodolite ne pouvaient guère se faire à plus de 250 pieds (76,20 m.) à cause de la fumée des chandelles, les alignements étaient généralement établis à l'aide d'une corde métallique à piano de 1/32 de pouce (0,0008) d'épaisseur. Ce procédé permettait de déterminer des alignements de 700 pieds (213,35 m.) en tendant la corde près du toit ; en se servant de fils à plomb avec une pointe d'acier fine et, en ajustant la corde avec des vis, la direction pouvait être donnée avec une exactitude telle qu'il n'était plus besoin de recourir au théodolite, tant que le souterrain se poursuivait sans courbe. Les repères étaient placés tous les 50 anneaux et toujours à une certaine distance du bouclier, pour éviter toute chance de mouvement. La direction était vérifiée tous les jours à l'aide d'une corde plus courte fixée au troisième anneau en arrière et plombée avec les deux autres.

Revêtement métallique. — La forme circulaire du revêtement métallique aurait été choisie parce qu'elle est la mieux appropriée pour résister aux poussées ; parce qu'avec la fonte on a la résis-

tance nécessaire avec une bien moindre épaisseur que pour la maçonnerie ; parce que cette moindre épaisseur permet de réaliser une économie sur la fouille ; enfin parce que le cuvelage en fonte se monte plus vite que la maçonnerie, ce qui permet d'éviter les puits provisoires si gênants pour la circulation.

Ces diverses affirmations seront discutées au chapitre XVI.

Les anneaux métalliques (fig. 63) ont 1 pied 8 pouces (0,508 m.) de longueur et se composent de six segments et d'une clef. Avec le diamètre intérieur de 10 pieds 2 pouces (3,11 m.), l'épaisseur du métal est de 1 pouce (0,025 m.) et les nervures ont une profondeur de 3 pouces 1/2 (0,089 m.), ce qui porte le diamètre extérieur à 10 pieds 11 pouces (3,33 m.). Les nervures ont 1 pouce 3/16 (0,03 m.) d'épaisseur. Dans le souterrain de 10 pieds 6 pouces (3,20 m.) de diamètre intérieur, les épaisseurs sont de 7/8 de pouce (0,022 m.) pour l'enveloppe et de 1 pouce 3/16 (0,03 m.) pour les nervures, dont la profondeur est de 3 pouces 5/8 (0,092 m.) : ce qui donne un diamètre extérieur de 11 pieds 3 pouces (3,43 m.). Tous les trous de boulons sont venus de fonte sans être retouchés ; le métal est de la fonte grise ; il est trempé dans une composition de poix et de goudron qui forme à la surface après refroidissement un enduit brillant très tenace.

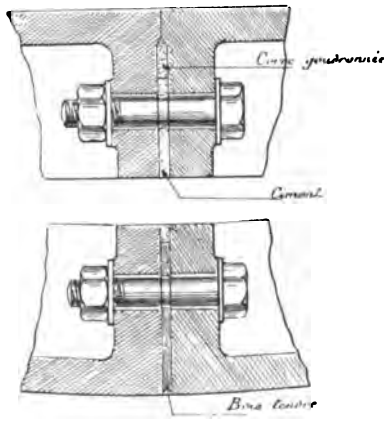


Fig. 65. — Détails des joints.

Les joints horizontaux ou longitudinaux (fig. 65) étaient garnis avec une fourrure de sapin tendre de 1/4 de pouce (0,006 m.) d'épaisseur. Pour les joints verticaux entre les anneaux, une corde de chanvre goudronnée était d'abord placée contre la portée (fig. 65) ; il était procédé ensuite au remplissage du joint avec du ciment Medina (ciment à prise rapide) ; ce joint aurait dû au contraire, pour suivre les légères variations de direction du bouclier, être très souple.

Dans les parties aquifères, le ciment à prise rapide fut remplacé par du ciment de fer, avant de remettre le souterrain à l'air libre.

La discussion du chapitre XVI montrera que l'on a beaucoup modifié la disposition de ces joints.

Dans les courbes, la différence entre les deux côtés était obtenue en forçant la garniture du côté de la courbe extérieure sans recourir à des pièces spéciales.

Boucliers. — Les 18 boucliers employés étaient du type représenté par les figures 66, 67, 68. Ils se composaient d'un cylindre de 5 pieds 11 pouces (1,80 m.) de longueur, formé de deux épaisseurs de tôle d'acier de 1/4 de pouce (0,006 m.) d'épaisseur chacune, assemblées à joints croisés avec des rivets fraisés sur les deux faces. Ce cylindre était renforcé par un fort anneau de fonte à l'avant, sur lequel se boulonnaient d'un côté les tôles et les fers profilés formant la cloison verticale et de l'autre les pièces mobiles en acier du couteau. Ces dernières pouvaient être ajustées dans diverses positions de manière à pouvoir faire la fouille, soit au même diamètre, soit à un diamètre plus fort que celui du bouclier; cette dernière disposition aurait été utile, surtout dans les courbes. Il a déjà été dit que c'était une erreur pouvant entraîner des tassements que de vouloir faire la fouille plus large que le corps de l'ouvrage, à propos du brevet de Barlow; en fait, par la suite, cette disposition toute théorique du couteau a été abandonnée.

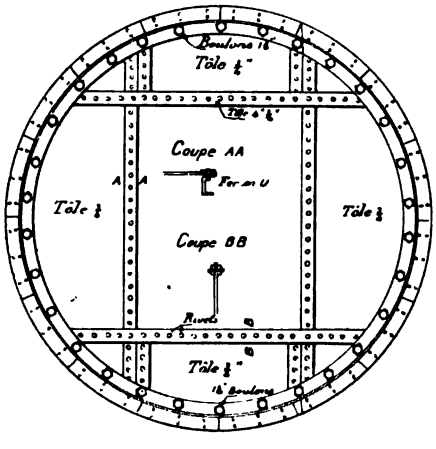


Fig. 66. — Elévation avant du bouclier.

Dans la cloison verticale il y avait, comme au souterrain de la Tour de Londres, une ouverture rectangulaire avec des portes en fer sur rouleaux pouvant être fermées subitement. Cependant, en pratique, ces portes furent enlevées; il y eut simplement en approvisionnement des pièces de bois de longueur voulue, prêtes à être placées dans les rainures destinées à la porte. Ces pièces de bois

furent employées quand le travail était interrompu, ou à la rencontre du terrain humide, s'il devait s'écouler un certain temps jusqu'à ce que les dispositions nécessaires pour travailler à l'air comprimé aient pu être prises. C'est là le point faible de ce type de bouclier, qui ne conviendrait guère dans les terrains très difficiles et dont la défectuosité est encore aggravée par la manière dont il était employé.

L'intérieur du cylindre en arrière de la cloison était revêtu de segments massifs en fonte (fig. 68), auxquels étaient boulonnées six presses hydrauliques de 6 pouces 1/2 (0,164 m.) de diamètre.

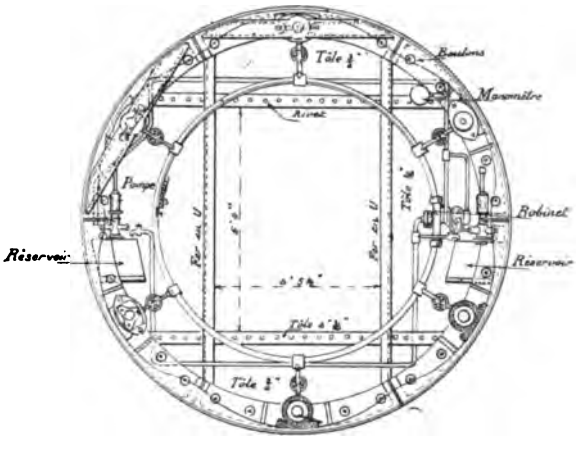


Fig. 67.
Elévation arrière du bouclier.

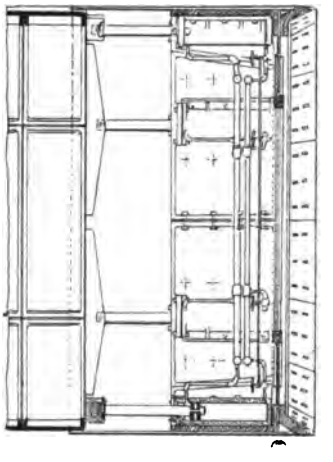


Fig. 68.
Coupe en long du bouclier

Ces presses étaient alimentées, à l'aide de deux bacs placés à l'intérieur du bouclier, au moyen de deux pompes à bras placées de chaque côté. Ces pompes pouvaient en général faire avancer le bouclier d'une longueur d'anneau en dix minutes avec une pression variant de 500 à 1 800 livres par pouce carré (35 kg. à 127 kg. par centimètre carré), développant un effort total de 6 à 27 t. suivant le nombre de presses en service, la quantité dont le couteau pénétrait dans le sol et suivant que l'on avançait en ligne droite ou en courbe.

A l'extrémité des tiges des presses étaient attachées de larges semelles pour répartir la pression sur le revêtement métallique,

sans développer d'efforts de flexion dans les tiges ni briser les nervures des segments.

L'extrémité arrière, ou queue du bouclier, sur 2 pieds 8 pouces (0,81 m.), se composait uniquement du cylindre en acier et servait d'abri pour le montage des anneaux du revêtement. Les segments se posaient sans appareil spécial, grâce à leur poids relativement

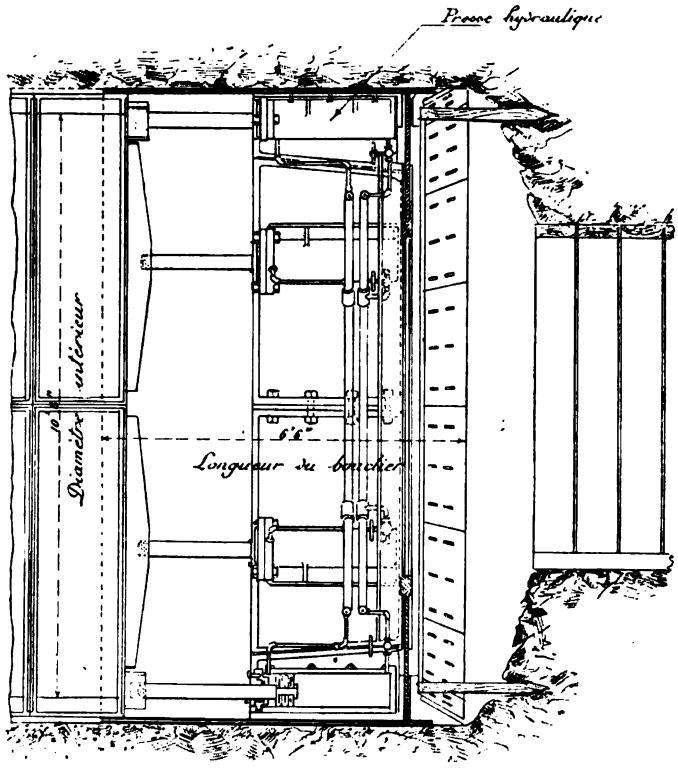


Fig. 69. — Avancement dans l'argile.

faible 4 cwt. 1/2 (229 kg.) ; il suffisait de six hommes pour les mettre rapidement en place ; pour les deux segments supérieurs et la clef, il était fait usage d'un échafaudage léger temporaire, qui aurait en tout cas été nécessaire pour les boulonner. Il y avait avantage à employer deux petits moufles pour soutenir les deux segments inférieurs jusqu'à ce qu'ils fussent assemblés, mais c'était là le seul outillage employé.

Dans la construction de ces boucliers, Greathead s'est surtout attaché : 1° à renforcer la partie avant et les couteaux et à raccourcir l'avant-bec de manière à éviter toute déformation du couteau ; 2° à amincir la queue de manière à diminuer le vide laissé en dehors du revêtement lors de l'avancement. C'est dire que ce bouclier a été conçu pour travailler dans un terrain ferme et compact comme l'argile de Londres. Ce principe est excellent, sauf en ce qui concerne la position de la cloison. Elle était tellement près du front d'attaque qu'il n'y avait pas de place pour faire la fouille; la saillie totale du bouclier et du couteau n'est que de 12 pouces (0,305 m.). Aussi a-t-il fallu toujours construire à 6 pieds (1,83 m.) en avant une petite galerie boisée, pour dégager. Avant la mise en marche du bouclier, on plaçait une série de coins ou de pieux appuyés contre la cloison du bouclier et dépassant ce dernier d'environ 2 pieds (0,61 m.)(fig. 69). Pendant que le bouclier avançait, les boisages de la petite galerie étaient progressivement desserrés; les coins détachaient le terrain et le couteau avait moins de travail à faire. Il est bien entendu qu'il ne s'agit pas ici du travail à l'air comprimé en mauvais terrain.

Les frais d'entretien des boucliers avec le parcours de 500 m. environ qu'ils ont eu à faire se sont bornés au remplacement des cuirs des pompes usés par les détritus tombés dans les bacs à eau.

Injection. — L'injection par une seringue, telle qu'elle avait été pratiquée au souterrain de la Tour, exigeait l'emploi d'un mortier très liquide et la force était insuffisante pour bien le faire pénétrer dans les vides. Greathead appliqua pour la première fois au City and South London son appareil d'injection aujourd'hui universellement connu. Il se compose d'un cylindre métallique (fig. 70) assez fort pour résister à une pression de 70 à 80 livres par pouce carré (5 kg. à 5,6 kg. par cm²) traversé par un axe tournant dans des boîtes à étoupe à chaque extrémité, muni à un bout d'une manivelle et portant des palettes à l'intérieur. L'eau et la chaux sont introduites par une ouverture placée sur le dessus du cylindre et munie d'un couvercle fermant hermétiquement ; le mélange est chassé par l'air comprimé dans un long tuyau

flexible qui se termine par une lance pouvant être introduite dans les trous ménagés dans le revêtement. Ce travail nécessite généralement deux ouvriers : l'un tourne continuellement les palettes, ouvre les robinets d'admission et d'échappement d'air, pendant que l'autre est chargé de la lance. A mesure que les vides sont remplis, les trous sont bouchés. L'opération se fait en partant du bas et en s'élevant jusqu'à la clef. Greathead préférait la chaux au ciment de Portland et surtout au ciment à prise rapide ; il trouvait le travail plus facile et la dépense moindre. Cependant, dans

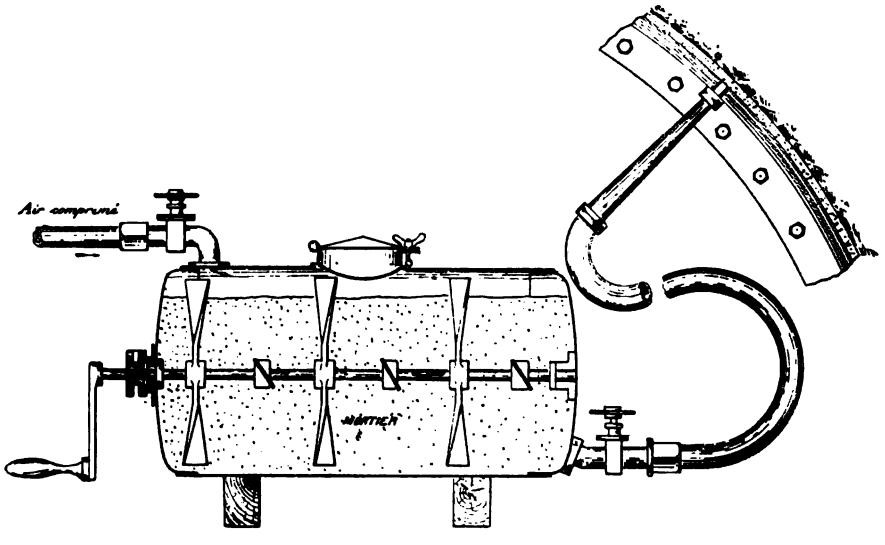


Fig. 70. — Appareil à injection Greathead.

certains cas on s'est servi de ciment. La chaux peut être mélangée au sable, cependant l'économie de chaux délayée ne compense pas l'excès de main-d'œuvre nécessaire pour faire le mélange. Il faut éviter avec soin tout excès d'eau qui aurait pour conséquence un retrait lors de la prise du mortier, tandis qu'en mettant juste la quantité d'eau nécessaire et en employant le mortier rapidement et au moment où il chauffe, il y a plutôt augmentation de volume.

Toutes les fois que l'occasion s'est présentée de démolir des portions de souterrain injectés, par exemple pour les élargissements de station, il a été reconnu que l'injection avait rempli les plus petits

vides. Dans des rognons, qui avaient été brisés et déplacés au passage du bouclier, le mortier avait pénétré dans des fissures de la pierre, minces comme une feuille de papier et rempli le vide laissé derrière elle par son déplacement. Le mortier injecté devenait en une heure au moins aussi dur que l'argile de Londres, et, au bout d'un jour ou deux, avait la consistance du béton. Les résultats furent excellents et évitèrent tout tassement; aussi l'appareil fut-il appliqué avec le même succès au fonçage des puits, à la consolidation de murs lézardés lors du passage du souterrain à Hibernian Warf, dans la construction des sas à air et enfin pour rendre étanches les boisages provisoires dans les couches aquifères.

L'appareil à injection est certainement un des facteurs essentiels du succès et, lui seul, permet d'éviter les tassements ultérieurs qu'entraîneraient les vides laissés fatalement derrière le bouclier et le revêtement.

Transport des déblais. — Au début une voie de service avait été établie sur des traverses reposant directement sur le revêtement métallique, et le roulage se faisait à bras; plus tard, la traction fut faite avec de petits chevaux et la voie posée sur une couche de terre provenant du déblai; les résultats furent encore assez médiocres. C'est ce qui conduisit dans les travaux analogues à installer la traction électrique.

Traversée des terrains aquifères. — Il reste à examiner les procédés employés pour la construction des souterrains dans les couches aquifères qui ont été rencontrées deux fois, sur 50 yards (45,72 m.), sous Swan Lane, près de la rive droite de la Tamise et sur 200 yards (182,88 m.) sous Clapham Road à l'extrémité sud près de Stockwell. Ces terrains se composaient de gros graviers et de sable, et la pression d'eau au-dessus du fond de fouille était d'environ 35 pieds (10,67 m.). Ce travail dut être fait à l'air comprimé et il fallut installer une usine de compression. Elle comprenait une pompe de compression, composée de deux cylindres à vapeur de 18 pouces (0,46 m.) de diamètre, travaillant avec une pression aux chaudières de 90 livres par pouce carré (6,3 kg. par

centimètre carré), et conduisant en tandem deux cylindres à air de 26 pouces de diamètre (0,66 m.), avec une course commune de 3 pieds (0,91 m.). Avec une vitesse de 50 tours à la minute, les pompes pouvaient aspirer 1 660 pieds cubes (46,84 m³) d'air libre.

L'air comprimé était employé dès que la couche d'argile se trouvait réduite au-dessus de l'ouvrage à 5 pieds (1,52 m.). La couche la plus dangereuse était en effet celle qui reposait directement sur l'argile ; elle se composait de gros graviers avec très peu de sable. La plus grosse difficulté, à laquelle se heurte l'emploi de l'air comprimé pour la construction des souterrains, provient de ce qu'il faut, pour maintenir l'eau, une pression d'air beaucoup plus forte dans le bas de la galerie que dans le haut, puisque la colonne d'eau à soutenir est plus haute ; c'est ainsi qu'à Stockwell, la charge d'eau à la clef n'était que de 25 pieds (7,62 m.), tandis qu'au radier elle atteignait 36 pieds 1/2 (11,11 m.). Avec un terrain assez compact, comme la vase ou le sable fin, la porosité du sol n'est pas assez grande pour laisser échapper un volume d'air important ; il n'y a pas un grand inconvénient à maintenir une pression d'air suffisante pour assécher le bas de la galerie, en supposant, bien entendu, qu'il y ait au-dessus de la voûte une couche de terrain suffisamment épaisse et lourde pour ne pas pouvoir être soulevée. Mais dans le sable grossier, et surtout dans le gravier dégarni de sable, la porosité et la perte d'air sont telles qu'il serait impossible de maintenir la pression sans des dispositions spéciales ; il faut toujours craindre, pendant l'exécution de la fouille, la perte d'un volume d'air exagéré et l'invasion de la galerie par l'eau. Si pareil accident venait à se produire, il s'en suivrait des éboulements et des désordres à la surface, comme Brunel en avait éprouvés, et la gravité des conséquences à redouter équivaudrait presque à l'impossibilité de faire le travail.

Greathead connaissait bien la difficulté, et pour la construction du souterrain de Woolwich, il avait fait établir un bouclier d'un type totalement différent, laissant en avant de la cloison verticale une large chambre de travail, bien isolée de manière à y cantonner les afflux d'eau et les éboulements qui, ainsi limités, n'auraient pu

acquérir de gravité. Les boucliers en usage au City and South London Railway n'offraient aucune des dispositions nécessaires pour exécuter avec sécurité un pareil travail. Il fallut recourir à un procédé, qui fait honneur à l'ingéniosité de son auteur, pour parer à un imprévu, mais que l'on a eu le grand tort de généraliser, sans comprendre qu'il n'était qu'une installation de fortune, à peine acceptable même à ce titre et certainement très dangereuse. Dès que le bouclier approchait des terrains aquifères, la galerie d'avancement centrale employée à faire la fouille dans l'argile

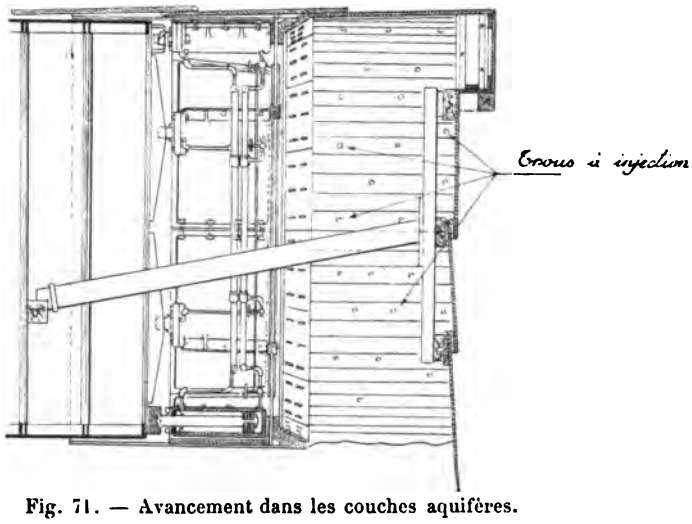


Fig. 71. — Avancement dans les couches aquifères.

était remplacée par une petite galerie (fig. 71), menée à hauteur du sommet du bouclier. Les planches de boisage de cette galerie reposaient d'un bout sur la partie avant du bouclier et de l'autre sur un boisage de face. Cette galerie était ensuite élargie suivant la forme circulaire jusqu'à ce que le tiers supérieur fût de même garni avec un boisage reposant sur le bouclier. Les mineurs plaçaient alors une couche horizontale maintenue contre le terrain au moyen d'un étai provisoire contre le bouclier ; ils continuaient à boiser la face et les côtés en plaçant d'autres couches horizontales butées de la même manière jusqu'à ce que la fouille fût terminée au niveau du bas du bouclier. Le nombre des couches et l'importance du boisage variaient avec la nature du terrain. Son

seul rôle était de maintenir la fouille jusqu'à ce que le bouclier fût avancé. Avant de procéder à l'avancement, toutes les couches étaient maintenues au moyen de pièces verticales soutenues par de longs étais passant à travers l'ouverture de la cloison verticale et butés contre une poutre placée en travers du souterrain; il était alors possible d'enlever les étais provisoires, et le bouclier était libre d'avancer. Cette méthode avait l'inconvénient d'augmenter la fouille de toute l'épaisseur du boisage, et d'exiger une grande quantité de bois qui était perdu après avoir servi quelques heures seulement. En outre, en cas d'accidents, les étais auraient empêché de fermer la porte. Avec cette façon de faire, le bouclier était peu utile et on en tirait bien peu de profit ; au City and South London, la traversée des terrains aquifères n'étant qu'un accident, on s'explique qu'on s'en soit contenté.

Pendant ce travail, durant six semaines, quand le sol était très poreux, il fallut faire marcher continuellement les machines de compression à leur maximum de vitesse de 50 tours par minute sans aucun arrêt. Les ingénieurs éprouvèrent par suite les plus graves inquiétudes. C'est alors que Greathead eut l'idée d'utiliser son appareil à injection pour faire pénétrer du mortier de chaux derrière les boisages par des trous préparés dans les planches. Les ouvriers ne s'y prêtèrent pas volontiers au début, cependant le résultat fut merveilleux. La vitesse de la machine put d'un coup être réduite à 30 ou 40 tours et l'avancement fut doublé. Les deux souterrains furent construits successivement dans ces conditions sous les conduites maîtresses des Compagnies de Lambeth and Southwark et de Wauxhall, qui alimentent en eau la plus grande partie de la portion Sud de Londres, ainsi que sous des égouts sans avoir le plus petit accident. La vitesse atteignit, par attaque, 4 pieds 6 pouces (1,37 m.) et 5 pieds (1,52 m.) par jour avec deux équipes. La pression ne dépassant pas 15 livres (1 kg.), le travail put être fait par les mêmes ouvriers qu'à l'air libre.

Sas à air. — Le premier sas à air employé avait été composé d'un cylindre en fer scellé dans une cloison en briques construite en travers du souterrain. Mais ce sas était petit et mal commode. Dans la suite les écluses furent formées en réduisant la section

du tunnel à l'aide d'un épais revêtement de maçonnerie de briques et de béton, dans lequel étaient placées deux portes en fer (fig. 72 et 73), encadrant une chambre de 12 pieds (3,66 m.) de longueur, 3 pieds 9 pouces (1,14 m.) de hauteur, 3 pieds (0,91 m.) de largeur, pour le passage des ouvriers, des matériaux et des déblais. Pour rendre cette chambre étanche, il fut encore fait usage de l'appareil à injection ; à cet effet des saignées de 3 pouces (0,076 m.) de largeur furent ménagées dans le massif de maçonnerie derrière chaque porte puis remplies de mortier sous une pression de 40 livres (2,8 kg.). Les massifs ainsi injectés furent d'une étanchéité absolue. Ce type de sas a l'avantage de ne comporter que de petits matériaux et de pouvoir être remplacé par un autre plus près de l'avancement quand cela est nécessaire, en faisant passer tous les matériaux par le sas. La brique en outre absorbe une grande quantité de chaleur pendant la compression qu'elle restitue à la décompression et les ouvriers sont par suite moins exposés aux refroidissements.

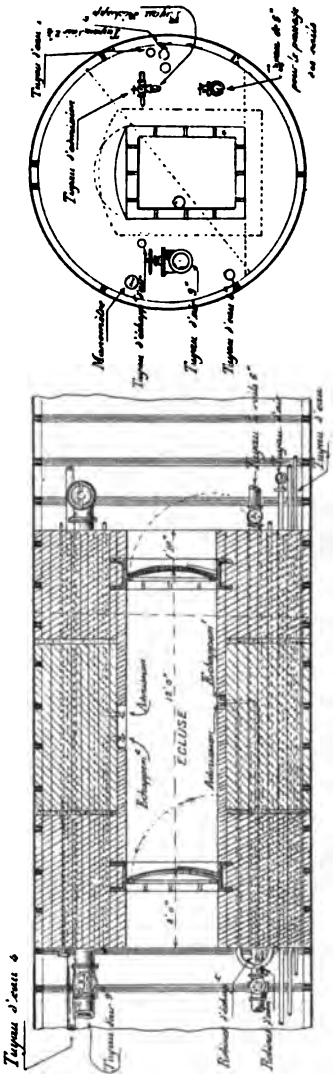


Fig. 72. — Coupe de sas à air.

Fig. 73. — Elévation du sas à air.

Dans la cloison étaient placés un gros tuyau pour le passage des rails de la voie provisoire, et divers tuyaux pour le service dont la désignation est indiquée sur la figure.

Prix de revient. — L'exécution des deux souterrains sous la

Tamise, c'est-à-dire sur une longueur cumulée de 1 500 pieds aurait coûté environ 30 000 livres sterling, ce qui ferait ressortir le prix par pied courant de souterrain à 20 livres et par mètre courant de galerie simple à 1 650 fr. Le prix moyen pour la longueur totale fut de 15 livres par pied (1 233 fr. par mètre).

CHAPITRE IV

SOUTERRAIN SOUS L'HUDSON

NEW-YORK

(1879-1889)

Exposé. — L'exécution du souterrain de la rivière Hudson est fort intéressante en ce sens qu'elle a été poursuivie pendant de longues années avant qu'il soit fait usage de la méthode du bouclier. Elle est par suite essentiellement propre à montrer la comparaison entre cette méthode et les procédés anciens, et il a, pour ce motif, paru intéressant d'insister un peu plus longuement sur les travaux antérieurs à l'adoption du bouclier.

Ce souterrain avait pour but de réunir la ville de New-York aux nombreuses lignes de chemins de fer, venant du Sud et de l'Ouest, qui aboutissent à New-Jersey, sur l'autre rive de l'Hudson et d'éviter les retards et les difficultés qu'entraîne l'emploi de ferry-boats. Les premiers essais furent tentés en 1874, mais le travail arrêté par des procès ne commença réellement qu'en 1879. Une Compagnie fut constituée, sous le nom de Hudson tunnel Railroad C°, au capital de 10 millions de dollars (50 000 000 fr.) ; elle avait comme président M. de Witt C. Haskin, auteur du projet ; le directeur des travaux était Mr J. F. Andersen et les ingénieurs conseils MM. Spielman et Brush.

Au point où la rivière devait être franchie, elle offre une largeur d'environ 1 600 m. Sur une longueur de 300 m. à partir de New-Jersey, la profondeur moyenne des eaux à marée basse est de 3 m. ; à 975 m. au delà, cette profondeur atteint par une pente uniforme son maximum de 19 m., puis elle diminue rapidement à 7, 60 m., cote qu'elle conserve jusqu'au quai de New-York.

Le lit de la rivière est entièrement recouvert de vase, sous laquelle se trouve, du côté de New-York, une couche de gros sable de 6 m. d'épaisseur, puis un banc de gros gravier. Le souterrain doit traverser ces deux dernières couches. A partir d'une distance de 183 m. du quai de New-York, et sur une longueur de 488 m. la vase recouvre une assise de rocher, à une profondeur de 24 à 27 m. au-dessous des basses eaux; l'épaisseur de la vase y est au moins de 8,50 m. Plus à l'ouest, cette épaisseur dépasse 30 m. Cette vase est très fine et forme quand elle contient 1/3 d'eau (ce qui se produit sous la pression de l'air), un tuf compact, tenace, ayant la consistance du mastic; elle pèse alors 1 750 kg. par mètre cube; elle est presque imperméable à l'air et à l'eau, bien qu'elle se délite facilement, sous un courant d'eau, en raison du sable qu'elle renferme. Cette matière se contracte beaucoup en séchant, et, aux endroits longtemps exposés à l'air, elle laisse évaporer l'eau, s'effrite et tombe.

Le souterrain était projeté en partant de la quinzième rue à Jersey City, pour aboutir à Morton street à New-York; il devait avoir 5 500 pieds (1 676 m.) de puits à puits. Le radier du côté de Jersey devait être à 13,70 m. au-dessous du niveau moyen des eaux, et à 19,80 m. du côté de New-York: il descendait avec une pente de 20 mm. sur 2400 pieds (731,50 m.); la pente se réduisait ensuite à 8 pouces par 100 pieds (0,0075 m.) sur 1 800 pieds (548, 60 m.) et était suivie d'une rampe de 30 mm. sur le reste du parcours jusqu'à New-York. Les voies d'accès devaient avoir une inclinaison de 20 mm.

Système Haskin. — L'emploi de l'air comprimé en souterrain avait été proposé en 1830 par lord Cochrane; M. Chesborough et d'autres ingénieurs américains auraient étudié la question et M. Sooy Smith aurait pris un brevet vers 1870. Quoi qu'il en soit, sauf le petit travail exécuté à Anvers vers 1879, on peut dire que la tentative faite à la rivière de l'Hudson a été la première. Malheureusement son auteur, M. Haskin, espérait de l'air comprimé bien plus qu'il n'en obtint, et l'expérience coûta fort cher. Il pensait qu'il n'y aurait aucune difficulté à maintenir la pression de l'air dans le souterrain et s'imaginait, qu'une fois la fouille

remplie d'air comprimé, elle conserverait sa forme, comme un ballon gonflé de gaz, et que par suite il n'était nécessaire de prévoir ni boisage ni aucune espèce de support jusqu'à l'exécution des maçonneries.

En 1874, quelques travaux furent commencés; mais des tassements s'étant produits, des procès furent engagés, et c'est en réalité de 1879 qu'il faut dater l'attaque du puits sur la rive de Jersey, Un puits (fig. 74) de 30 pieds (9, 14 m.) de diamètre fut descendu, en laissant entre sa paroi et le mur du quai une distance de 83 pieds (25,30 m.). Le terrain se composait de 10 pieds (3,05 m.) de remblai, formé surtout de cendres et escarbilles, de 45 pieds (13, 72 m.) de vase et enfin de sable sur une profondeur inconnue. Le puits fut construit en maçonnerie de briques et ciment, avec des parois d'une épaisseur de 2 pieds 4 pouces (0,71 m.) au sommet, puis croissante jusqu'à 4 pieds (1,22 m.) à la base, fixée à 60 pieds (18,29 m.) de profondeur.

Le puits put d'abord être creusé à sec; la terre provenant de la fouille était enlevée, dans des bennes, par une machine à vapeur. Jusqu'à ce que l'on ait atteint le sable à une profondeur de 55 pieds (16, 76 m.) un pulsomètre suffit à enlever le peu d'eau qui venait. A ce moment le débit d'eau atteignit 200 gallons par minute (0,909 m^3.) et il fallut installer des pompes. Pendant ce travail le cube de terre enlevé fut bien supérieur au vide de la fouille; l'argile coulait le long des parois et reparaissait en passant sous le couteau dans la fouille. Il en résulta des tassements, aggravés par ce fait que la couche superficielle de remblai adhérait aux parois du puits et descendait avec lui. Cette adhérence gênait d'ailleurs la descente; à un moment elle s'arrêta, sauf du côté où se trouvait la machine; cette dernière fut transportée de l'autre côté dans l'espoir que les vibrations faciliteraient le travail.

Quand le puits fut à fond, pour arrêter les écoulements de vase sous la base du puits, on fit un radier en béton. A cet effet un puisard fut creusé, dans une enceinte de palplanches et revêtu en briques à sec. Les eaux y furent amenées de toute la surface du puits par une série de tuyaux de 4 pouces (0,10 m.). Le radier fut alors construit; il se composait d'une couche de maçonnerie à pierres sèches autour des tuyaux, sur une épaisseur de 12 à 18 pouces

(0,30 m. à 0,45 m.); puis de béton coulé par couches de 8 à 12 pouces (0,20 m. à 0,30 m.) jusqu'à une épaisseur totale de 2 pieds 6 pouces (0,76 m.) au centre et 3 pieds à 3 pieds 9 pouces (0,91 m. à 1,14 m.) sur les bords. La venue d'eau dans le puisard tomba à 80 gallons (363 lit.) par minute; mais l'eau amenait encore 4 pieds cubes (112 lit.) de sable et de vase par jour; le remplissage du puisard à pierres sèches ne put y remédier; un tuyau vertical de 12 pouces (0,305 m.) de diamètre fut alors placé dans le puisard, monté jusqu'à 24 pieds (7,31 m.), et enfin raccordé par un cône de 7 pieds 1/2 (2,29 m.) de longueur, avec un tuyau de 4 pouces (0,10 m.) de diamètre, qui s'élevait jusqu'au-dessus du niveau des hautes eaux. L'eau monta dans ce tuyau jusqu'à 9 pieds (2, 74 m.) au-dessous des moyennes marées et y subit des fluctuations proportionnelles à celles du niveau de l'eau dans la rivière, mais environ un tiers moins forte. Cette eau disparut un moment quand le banc de sable fut atteint dans la fouille du souterrain, où elle coulait à raison de 5 gallons (23 lit.) à la minute. Mais dès que l'air comprimé fut introduit dans la galerie, elle reparut, avec de forts bouillonnements dus à l'air, qui lançaient l'eau jusqu'à 15 et 20 pieds (4, 57 m. à 6, 10 m.) au-dessus des hautes eaux moyennes. Le tuyau fut alors fermé par un couvercle et ne servit plus que comme réservoir d'eau pour l'exécution des maçonneries et pour diluer la vase.

Après qu'il eut été procédé à l'entretoisement du puits et que des planchers de service eurent été installés, la paroi Est fut attaquée à 23 pieds (7,01 m.) au-dessous de la marée moyenne, soit à 35 pieds (10,67 m.) au-dessous de la surface. Les difficultés rencontrées dans le fonçage du puits avaient démontré qu'il était impossible de faire le souterrain sans recourir à l'air comprimé; la vase était tellement molle qu'elle coulait à travers un trou de 3/4 pouces (0,019 m.) dans les planches employées pour la maintenir, comme dans une machine à mouler la brique. Un petit sas à air fut donc installé dans la paroi et la première fouille à l'air comprimé put être attaquée le 28 décembre. Comme M. Haskin avait l'intention à ce moment d'exécuter un souterrain à deux voies, il fit attaquer sur la largeur de ce souterrain une petite galerie contournant le puits avec de simples boisages. Le 2 jan-

vier la fouille était faite sur 15 pieds (4,57 m.) de largeur, 6 pieds (1,83 m.) de hauteur et 4 pieds (1,22 m.) de longueur.

Dès le début, il se forma dans la vase, sous l'action de l'air, de petits trous, gros comme des trous d'épingle ; puis il se déclara de légères fissures qui, le lendemain, devenaient de véritables fentes par où l'air s'échappait, pendant que la vase se détachait en mottes de quelques pouces à 1 pied (0,30 m.) de diamètre. La situation s'aggrava rapidement, les fissures s'étendirent jusqu'au terrain meuble entraîné par le fonçage du puits ; l'air s'échappait et l'eau commençait à couler en délayant la vase ; il fallut se décider à abandonner le travail et à laisser les éboulements se produire de façon à pouvoir travailler dans un terrain bien tassé.

M. Andersen conseilla alors l'emploi d'une méthode qui lui avait réussi pour la réparation de cylindres de fondations de ponts brisés par le choc des navires. Il avait mis dans ces cylindres un revêtement métallique en fer, composé de morceaux assez petits pour pouvoir passer par les sas à air et raccordés ensuite entre eux par des nervures et des boulons. Il commanda des tôles pour une galerie de 6 pieds 4 pouces de diamètre (1,93 m.) ; elles devaient avoir 1/2 pouce (0,013 m.) d'épaisseur, une largeur de 2 pieds 6 pouces (0,76 m.) et une longueur de 4 pieds (1,22 m.) avec des cornières à ailes de 3 pouces (0,076 m.) rivées sur les bords. Pendant leur fabrication, dans le but de soulager le toit des galeries, dans la traversée de la partie du terrain bouleversé par le fonçage du puits, une fouille de 30 pieds (9,14 m.) de largeur et de 9 pieds (2,74 m.) de profondeur au-dessous des hautes eaux fut exécutée à la surface sur une longueur de 20 pieds (6,10 m.), à partir de la paroi du puits en se dirigeant vers la rivière. Dans le fond de cette fouille fut placée une grande toile, relevée de quelques pieds contre les parois du puits ; puis de grosses poutres de 30 pieds (9,14 m.) de longueur destinées à maintenir et à porter le remblai.

Les plaques de fer avaient été commandées au diamètre de 6 pieds 4 pouces seulement (1,93 m.) parce que l'ingénieur en chef M. Brush, avait émis l'idée qu'il fallait commencer avec une très petite section pour démontrer la possibilité du travail et l'élargir

successivement de manière à arriver dans le terrain non bouleversé à pleine section.

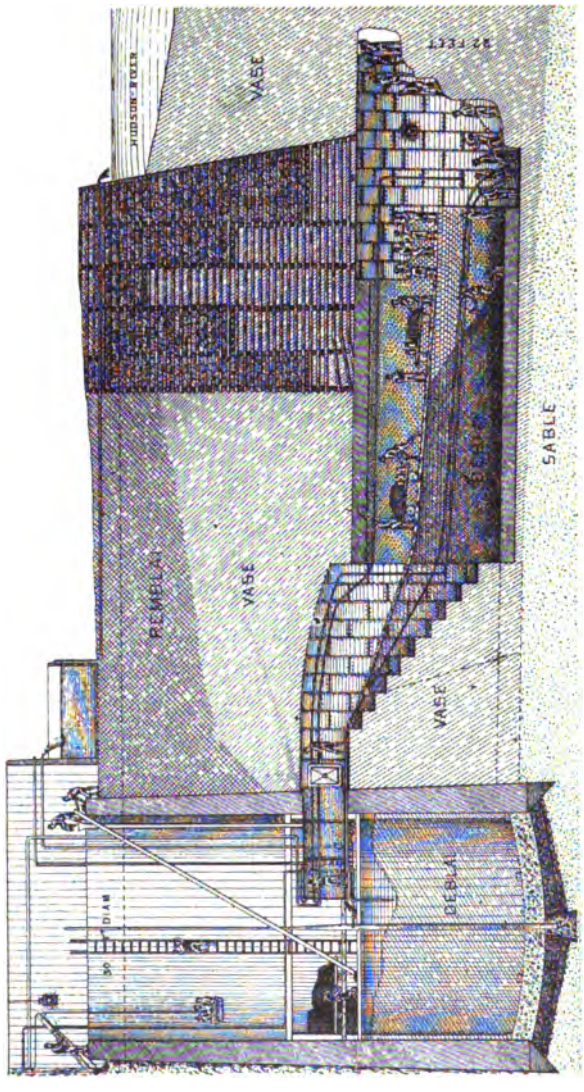


Fig. 74. — Coupe en long du puits, de l'entrée provisoire et du souterrain.

Quand le toit était tombé le 2 janvier, les débris s'étaient accumulés derrière la porte du sas qui était fermée. Les ouvriers essayèrent de l'ouvrir avec une presse hydraulique, mais ils ne purent que l'entre-bâiller de 10 pouces (0,25 m.). Aussitôt l'eau se

précipita à raison de 50 gallons (227 lit.) par minute. Il fallut rétablir l'air comprimé et dégager la porte par le trou du regard dont on avait brisé le verre. Le travail fut repris le 13 janvier et le 16 un premier anneau de 4 pieds (1,22 m.) de longueur était posé. Le second fut terminé le lendemain. Une série d'anneaux de 2 pieds 6 pouces (0,76 m.) de longueur et dont le diamètre allait en croissant de 18 pouces (0,45 m.) furent placés de même. Au bout de 30 pieds (9,14 m.) le diamètre atteignait 19 pieds (5,79 m.). C'est au cours de ce travail que M. Haskin renonça à l'idée d'un souterrain unique et décida de faire deux souterrains parallèles à voie unique, qui furent appelés « souterrains jumeaux ».

Le désir d'aller très vite empêcha d'apporter à ce travail tout le soin désirable. Les anneaux n'étaient réunis les uns aux autres qu'au sommet et étaient libres du bas dans la partie en gradins ; les plaques du bas manquaient dans les anneaux 1,10 et 11. Enfin pour tout revêtement il n'y avait qu'un peu de béton sur les gradins inférieurs. Cette façon de procéder constituait une imprudence et le désordre du terrain, qui en résulta, devait avoir les plus graves conséquences. L'installation du puits comportait en dehors du sas à air de 6 pieds (1,83 m.) de diamètre et 14 pieds (4,27 m.) de longueur, deux compresseurs et une pompe Deane sur le plancher du puits, avec une chaudière à la surface. Les compresseurs étaient : un compresseur Clayton de 11 chev. marchant à 35 tours et un compresseur Ingersoll de 8 chev. faisant 55 tours à la minute. La vapeur produite par la chaudière à 75 livres par pouce carré (5,3 kg.) était utilisée sur les pistons à 34 livres (2,4 kg.). Les compresseurs pouvaient aspirer par vingt-quatre heures 83 000 pieds cubiques (2 342 m³) d'air, qu'ils refoulaient à la pression de 18 livres (1,3 kg.). Ils assuraient ainsi environ 125 pieds cubiques (3,500 m³) d'air frais par heure à chaque ouvrier.

Exécution du souterrain. — A l'extrémité de ce premier parcours de 30 pieds, qui fut considéré comme une entrée provisoire, commença l'attaque du souterrain du Nord. Il devait comporter un revêtement métallique par anneaux de 2 pieds 6 pouces

(0,76 m.) bien boulonnés entre eux et une maçonnerie de briques à l'intérieur. Chaque anneau était formé de 14 plaques de 3/8 pouce (0,01 m.) d'épaisseur ; les 6 plaques de la partie supérieure avaient environ 3 pieds (0,91 m.) de longueur et pesaient chacune 170 livres (77 kg.) ; les 8 plaques d'en bas avaient environ 6 pieds (1,83 m.) de longueur et pesaient chacune 320 livres (145 kg.). Le poids total d'un anneau était donc de 3 580 livres (1 624 kg.). Ce poids comprenait les cornières à ailes de 3 pouces (0,076 m.) fixées sur les bords avec des rivets d'un 1/2 pouce (0,013 m.) espacés de 6 pouces (0,15 m.) d'axe en axe. Les plaques étaient réunies à joints croisés par des boulons de 3/4 de pouce (0,018 m.) espacés de 9 pouces (0,23 m.) d'axe en axe. Le revêtement intérieur était exécuté en maçonnerie de briques dures avec mortier de ciment composé de 2 parties de ciment pour 3 de sable ; son épaisseur était de 2 pieds (0,61 m.). Le diamètre extérieur étant de 22 pieds (6,72 m.), le diamètre libre à l'intérieur du revêtement se trouvait de 18 pieds (5,50 m.).

La vase était, en général, assez ferme pour pouvoir, à l'avancement, être découpée par gradins, répondant à un talus de 45°. Il y avait, en général, 5 anneaux en cours de montage. Les 4 plaques de couronnes posées les premières devaient seules être maintenues par quelques étais, qui étaient d'ailleurs supprimés dès que la partie basse était en place ; le revêtement se maintenait sans aucun boisage, sous l'action de l'air comprimé, une fois qu'il était boulonné aux anneaux précédents. Les pièces de bois de 4 pouces sur 6 (0,10 m. × 0,15 m.) qui étaient placées en travers de la galerie, appuyées sur les nervures, n'avaient en effet d'autre but que de porter le plancher de service.

L'ingénieur en chef, M. Brush, fit une expérience pour montrer que l'air comprimé servait à soutenir le revêtement. A ce moment, la profondeur était de 54 pieds (16,45 m.) au-dessous des hautes mers au bas de la galerie et, par conséquent, de 32 pieds (9,75 m.) en haut puisque le diamètre extérieur était de 22 pieds (6,70 m.). La pression de l'air était environ de 18 livres par pouce carré (1,3 kg.), c'est-à-dire à peu près égale à la charge moyenne. Il donna l'ordre de laisser tomber la pression ; en quelques heures la charge latérale du terrain fit fléchir de 2 pouces (0,05 m.) les

poutres servant de support à la plate-forme. Mais aussitôt que la pression se releva le resserrement prit fin.

Le déblai n'était pas évacué par le sas. La moitié environ était délayée avec de l'eau à raison de 1 partie d'eau pour 4 parties de vase, et le mélange liquide était chassé au dehors par un tuyau sous l'effet de la pression. L'autre moitié était reportée à l'arrière dans la partie terminée du souterrain ; avec cette charge la galerie avait un poids égal au volume de vase qu'elle remplaçait et M. Hastin espérait qu'en raison de cet état d'équilibre la vase se tasserait également sur sa surface extérieure et la protégerait contre toute déformation.

Galerie du Nord. — Le travail se poursuivit régulièrement dans ces conditions du 9 février au 23 juin 1880. A cette date, les plaques de sommet du 99e anneau à 281 pieds (85,80 m.) du puits étaient en cours de pose. Le revêtement en briques était arrêté au 95e anneau à 270 pieds (82,29 m.). Dans tout ce parcours le souterrain passait sous un warf construit dans la rivière, et était relativement protégé.

Cependant, au 9e anneau, il avait rencontré les fondations du vieux quai dont il avait fallu enlever 3 pieds (0,91 m.) de la partie arrière. Il y eut alors de fréquentes fuites d'air qui s'étanchaient avec de la vase fraîche. La plus dangereuse se produisit le 27 février. La pression tomba de 18 à 12 livres (1,3 kg. à 0,84 kg.) quoique le nombre de tours du compresseur Clayton eût été porté de 18 à 120. On s'en rendit maître en une heure ; l'eau avait déjà fait irruption en deux endroits contre le puits, et, d'autre part, à la surface, près d'une maison à 30 pieds (9,14 m.) du puits il s'était formé un trou de 9 pouces (0,23 m.) de diamètre par où le sable et l'eau jaillissaient sous la poussée de l'air à environ 6 pieds (1,83 m.) au-dessus du sol.

Il y eut toujours des mouvements dans la vase, qui tordaient ou déplaçaient le revêtement métallique avant l'exécution de la maçonnerie, à laquelle il était impossible de donner une épaisseur régulière. L'alignement et le nivellement étaient par suite défectueux ; le radier fut à certains moments 6 pieds (1,83 m.) trop bas et l'écart latéral atteignit 2 pieds (0,61 m.). Ces défauts furent

attribués à quatre causes : en premier lieu, quoique la galerie eût une forme elliptique de 16 pieds de largeur sur 18 de hauteur, les plaques de revêtement étaient préparées circulaires et ne pouvaient épouser qu'avec peine la forme du souterrrain ; en second lieu, la direction n'apportait peut-être pas un soin suffisant à l'implantation de l'ouvrage ; en troisième lieu, le revêtement métallique était trop léger pour résister à la poussée des terres et restait beaucoup trop longtemps exposé aux déformations avant d'être renforcé par l'exécution de la maçonnerie de briques.

A la fin de mai, la maçonnerie était à 55 pieds (16,76 m.) en arrière de l'avancement ; les anneaux insuffisants, sans boisage, commencèrent à se tordre et à tasser ; il devint très difficile de les placer à leur niveau exact et il existait une pente de 10 p. 100 sur les quatre derniers anneaux. Les ouvriers ne purent réussir à boulonner les anneaux 96 à 99 et, après avoir maçonné l'anneau 95, il fallut se décider à suspendre le travail.

M. Haskin espérait qu'en laissant le terrain se tasser, il pourrait reprendre la fouille dans une masse compacte ; dans ce but, il fit fermer l'avancement avec un remblai soigneusement pilonné et arrosé, sur la longueur des quatre anneaux disloqués, et donna l'ordre d'attendre.

Par contre, la partie maçonnée se comportait assez bien. Il n'y eut de mouvements qu'au commencement de juin pendant l'attaque de la galerie Sud. Il se produisit une fissure à la voûte sur toute la longueur du souterrain, des fissures transversales à 155 pieds (47,23 m.) et 200 pieds (60,95 m.) et quelques fissures fines dans les joints. Elles furent remplies ; cependant, quoiqu'il ne s'en reproduisit pas d'autres apparentes, les pertes d'air devinrent plus importantes et il fallut faire un enduit pour les atténuer.

Galerie du Sud. — L'attaque de la galerie Sud et son raccordement à l'entrée provisoire ne purent se faire qu'au prix des plus grandes difficultés. Elle fut poussée sur environ 20 pieds (6,10 m.). A ce moment, dès que la pression venait à baisser, l'eau arrivait en abondance ; cela tenait à ce que l'avancement était arrivé à proximité du mur de quai. Il fallut comme dans l'autre galerie s'arrêter et blinder l'avancement.

En résumé, ce procédé bien primitif ne permit d'exécuter que les parties de galerie protégées contre l'eau par un remblai, et dans l'une comme dans l'autre, l'eau et l'argile molle arrêtèrent le travail dès que l'on approcha de la rivière. M. Haskin résolut tout d'abord de reprendre et de consolider l'entrée provisoire.

Entrée provisoire. — L'état de cette entrée ne permettait pas en effet d'élever la pression de l'air, comme il eût été nécessaire de le faire pour pouvoir continuer. Le toit de cette entrée étant plus haut que celui des souterrains et les plaques de fer insuffisamment réunies, il se produisait des pertes d'air importantes, ainsi d'ailleurs que dans la partie inférieure des gradins où il n'y avait aucune liaison dans le revêtement. La vase, soumise à une pression supérieure à sa charge hydrostatique, perdait son humidité et devenait perméable. Il y avait constamment une équipe occupée à étancher ces fuites avec de la vase fraîche. Il y en eut de très sérieuses dont on parvint cependant à se rendre maître. Chaque fois que l'écluse était ouverte les fuites augmentaient. La chambre de travail comprenait à ce moment, outre l'entrée provisoire et l'amorce de la galerie Sud, les 270 pieds de la galerie Nord, ce qui formait un réservoir d'air important. Néanmoins pour remplir le sas, qui était de faible capacité, il fallait activer la marche des compresseurs; cette précaution ne suffisait pas à éviter une baisse de pression, accompagnée d'une brume intense, de sorte que, malgré les lumières, les ouvriers étaient dans l'obscurité. Ces variations de pression entraînaient des déplacements de cuvelage, et l'ouverture de fissures dans le terrain par où l'air s'échappait. Lorsque la porte de l'écluse était fermée brusquement, au moindre choc provoqué par la chute d'un objet lourd, dans le petit bout de l'entrée provisoire, il se produisait un mouvement de l'air singulier et une onde vibratoire se propageait dans les galeries avec assez de force pour jeter à terre les boisages et les cintres, s'ils n'avaient été bien assurés. Peut-être cela était-il dû à la forme conique de l'entrée provisoire. Quoi qu'il en soit, avant d'élever la pression pour pouvoir continuer les galeries, il était de toute urgence de reprendre la partie où devait être fait le souterrain de jonction à deux voies.

L'opération se fit à reculons en partant des attaques des deux galeries. Le travail fut commencé le 28 juin. Il fallait enlever les anneaux métalliques provisoires et les remplacer par d'autres. Le 8 juillet, 4 anneaux étaient terminés. Pendant que les maçons commencaient le radier dans cette partie, les mineurs poursuivaient l'élargissement de la voûte avec 36 pieds (11 m.) de largeur. Ils atteignirent ainsi le 7 juillet la paroi du puits. L'intention primitive avait été de procéder par étages, en maçonnant successivement les anneaux aussitôt après leur achèvement et de s'arrêter à 6 pieds (1, 83 m.) du puits où aurait été construit un mur provisoire. Mais le succès obtenu dans la pose des 4 premiers anneaux donna de la hardiesse, et fit croire qu'il était possible de se fier au revêtement métallique; la maçonnerie fut arrêtée où elle se trouvait dans les premiers anneaux, c'est-à-dire à 4 pieds (1, 22 m.) de hauteur et, au lieu de faire le mur provisoire, la fouille fut poussée jusqu'au puits.

Le 21 juillet, les hommes étaient occupés au travail délicat de la pose des dernières plaques près du puits. Il fallait les insérer exactement dans l'espace libre. C'était un travail difficile qui nécessitait souvent l'emploi du marteau; les chocs avaient pour effet de faire jouer les plaques posées et la vase au-dessus. Une plaque était en partie placée quand les hommes quittèrent le chantier à l'heure du changement de poste. A ce moment une fuite se déclara. Le chef de chantier Burns rappela les hommes pour l'aider à la tamponner avec de l'argile, mais la fuite s'étendit rapidement tout autour du puits et en arrière. Le chef dut crier aux hommes de se sauver; six avaient déjà gagné l'écluse quand un éboulement se produisit, entraînant les plaques et barrant la porte avec des débris. Malgré leurs efforts ils ne purent enlever l'obstacle de manière à permettre aux autres hommes de pénétrer dans l'écluse. Le chef leur commanda alors d'enlever la pression et de sortir pour chercher des secours. Pour aller plus vite ils brisèrent l'œil-de-bœuf et, comme la porte de communication du sas était entr'ouverte, la pression tomba également dans le souterrain, ce qui permit à l'eau de pénétrer. De là elle gagna le puits et submergea l'écluse; de sorte qu'il fut impossible d'arriver jusqu'aux vingt hommes, qui étaient restés. Ils furent tous noyés, et cependant ils

auraient eu assez de temps pour s'échapper, si les précautions nécessaires eussent été prises.

On peut dire, sans exagération, que cet accident a été dû à une série d'imprudences graves, à des illusions singulières sur le danger que pouvait présenter l'exécution d'un pareil travail avec des procédés aussi imparfaits.

Emploi d'un caisson. — On essaya d'abord de pomper pour retrouver les corps des victimes, mais le puits était évidemment en relation avec la rivière par le sas qui était resté ouvert et l'eau y suivait toutes les fluctuations de la marée. Les pompes furent impuissantes.

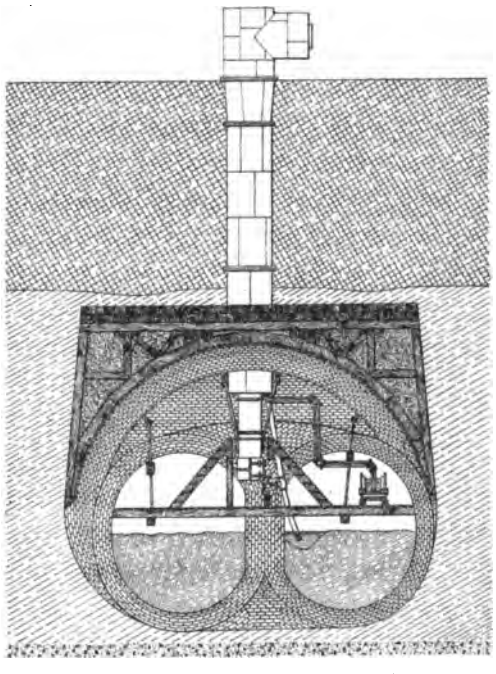


Fig. 75. — Coupe en travers du caisson. Côté New-Jersey.

Le 23 juillet, M. Haskin décida d'isoler par un batardeau une enceinte de 46 pieds (14,02 m.) de longueur, comprenant une partie du puits, les 30 pieds (9,14 m.) de l'entrée provisoire et 5 pieds (1,52 m.) des deux souterrains jumeaux. L'enceinte, bâtie à 40 pieds (12,19 m.), de profondeur en pin jaune, se composait de pieux équarris de 12 pouces (0, 305 m.) et de palplanches de 12 × 6 pouces (0, 305 m. × 0, 15 m.). Dès qu'elle fut terminée, le 29 juillet, la fouille fut attaquée. Un premier cadre put être placé à 10 pieds (3,05 m.); mais, l'eau commençant à gêner, il fallut mettre un éjecteur à vapeur d'une puissance de 200 gallons (0,909 m³) à la minute. Le 9 août, une seconde rangée de poutres fut mise en place à 15 pieds (4,57 m.) de profondeur, mais quoiqu'on eût placé des pompes pouvant élever 8000 gallons

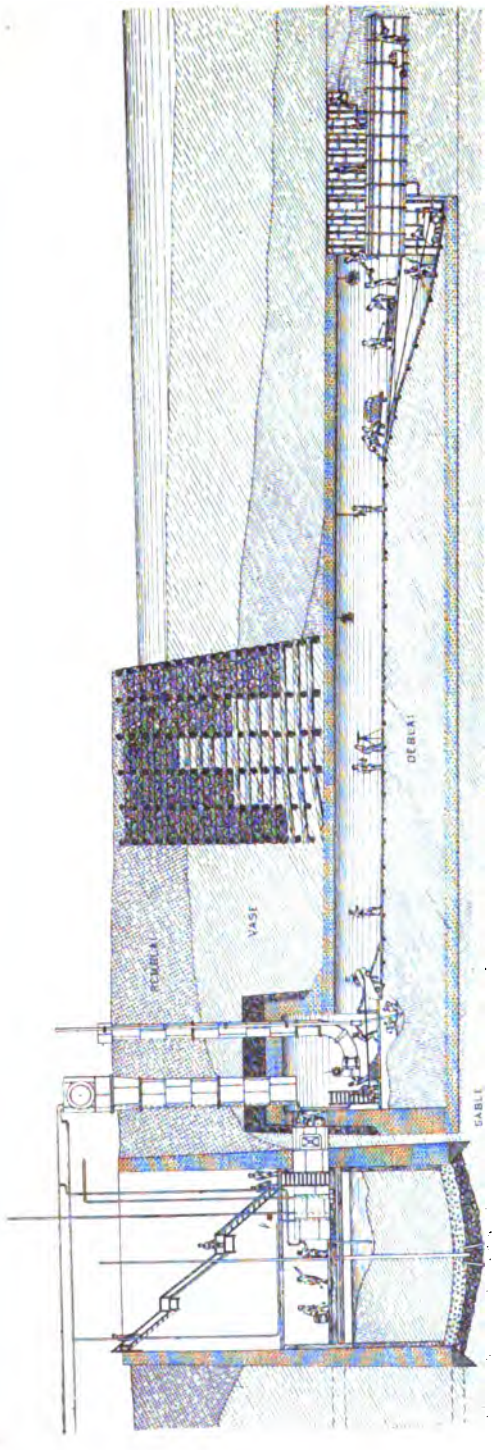


Fig. 76. — Coupe en long du puits, du caisson, du souterrain et du pilote. — Côté New-Jersey.

(36,350 m³) à la minute, elles furent encore trop faibles pour maîtriser la venue d'eau et tout espoir d'exécuter la fouille à l'air libre fut perdu.

M. Haskin décida de recourir à un caisson à l'air comprimé. (fig. 75 et 76). Ce caisson en bois fut construit dans la fouille même. Il avait 41 pieds 1/2 (12,65 m.) sur 24 pieds (7,32 m.) de dimensions extérieures en bas et 22 pieds de hauteur (6, 71 m.). Les côtés étaient montés avec un *fruit* de 2 pieds (0, 61 m.). A l'intérieur, la chambre de travail était voûtée suivant un arc de cercle de 20 pieds 4 pouces (6,20 m.) de rayon et de 17 pieds (5,18 m.) de flèche, dans un plan perpendiculaire à l'axe du souterrain. Cette voûte était formée de morceaux de pin jaune de 6 pieds (1,83 m.) de longueur, 10 pouces (0, 25 m.) d'épaisseur et 12 pouces de largeur (0,30 m.) placés à joints brisés et solidement réunis par des boulons de 5/8 pouce (0, 016 m.) de diamètre. L'intérieur du caisson fut bordé avec des planches de 10 pouces (0,25 m.) de largeur sur 4 pouces (0,10 m.) d'épaisseur, le tout recouvert de lames de plomb et d'asphalte. Au-dessus

de la voûte les parois du caisson se prolongeaient sur 12 pieds (3,66 m.) de hauteur formant une boîte qui fut remplie de ferrailles et de déblais pour aider à la descente. L'ensemble était suspendu à de fortes poutres placées à la surface, par 12 tiges à vis en fer de 3 pouces (0,76 m.) de diamètre. La chambre de travail communiquait avec l'extérieur par deux cheminées munies de sas à air, l'une de 2 pieds 1/2 (0,076 m.) pour les matériaux, l'autre de 5 pieds (1,52 m.) en bas et de 6 pieds (1,83 m.) en haut pour les ouvriers.

Reconstruction de la partie éboulée. — Quand le caisson fut arrivé à une profondeur de 39 pieds (11,89 m.) et que l'on eut retrouvé les corps, il restait à faire trois opérations distinctes : 1° le raccordement avec le sas à air du puits; 2° la construction d'une chambre solide; 3° le raccordement avec les souterrains pour reprendre l'avancement. Il fallut y apporter beaucoup d'habileté et d'énergie.

Première opération. — La première porte du sas fut tout d'abord réparée; la seconde, qui était faussée, dut être enlevée et redressée. Quand tout fut remis en ordre, la pression fut rétablie, sans toutefois dépasser une charge de 10 livres (0,7 kg.), en raison du mauvais état du sol. Les ouvriers exécutèrent alors, en partant du sas, une fouille de 4 pieds (1,22 m.) de diamètre qu'ils poursuivirent jusqu'à la paroi du caisson, immergé à 3 pieds (0,91 m.) du puits. Cette paroi fut découpée sur le même diamètre et la fouille blindée avec un anneau en fer de 4 pieds (1,22 m.) de longueur, cloué d'une part au bordage du caisson et d'autre part solidement boulonné au sas qu'il recouvrait de 6 pouces (0,15 m.). La pression put être portée à 15 livres (1,05 kg.). En perçant le bordage intérieur du caisson de 4 pouces (0,10 m.) d'épaisseur et la feuille de plomb, la communication fut établie entre le puits et le caisson.

Deuxième opération. — Il a été dit que sur la largeur de 8 pieds (2,44 m.) correspondant à deux anneaux, la maçonnerie était montée sur 4 pieds (1,22 m.) de hauteur. Le couteau du caisson était arrêté à 14 pieds (4,27 m.) au-dessus. Le travail de reprise en sous-œuvre et la construction de la maçonnerie sous le caisson

se firent à l'aide de petites fouilles, revêtues de plaques métalliques et maçonnées aussi rapidement que possible, sur les deux flancs. Sur la face Est, la pile qui séparait les deux souterrains jumeaux fut reprise et montée jusque sous le couteau du caisson pour le soutenir, la vase qui encombrait l'entrée des souterrains fut laissée sur place, et le raccordement effectué à l'aide de plaques métalliques boulonnées d'un côté aux plaques de revêtement des galeries et clouées de l'autre aux parois du caisson qui étaient exactement découpées suivant la forme des voûtes. Cette opération se fit avec beaucoup de précautions et par très petites parties. Pendant ce travail, la pression baissa plusieurs fois et la chambre se remplit d'eau, mais les ouvriers pouvaient se réfugier dans la partie haute ou la cheminée du sas. La paroi Ouest du caisson fut revêtue par un mur provisoire de 4 pieds (1,22 m.) d'épaisseur dans lequel aboutissait le raccordement avec le sas du puits. La chambre fut voûtée et se trouva bien consolidée et en communication avec l'extérieur par le sas du puits et les deux sas du caisson.

Troisième opération. — Il n'y eut de difficulté que pour le tunnel Sud. Il était rempli d'eau, sauf une digue de vase près du caisson. M. Andersen proposa de le remplir sur toute sa hauteur de vase bien tassée avant d'y entrer. Il fit enfoncer dans la digue un tuyau dont le bout du côté du caisson était recourbé et muni d'un robinet. Cette extrémité du tuyau plongeait dans un baquet plein d'eau et de vase; dès que le robinet était ouvert, la pression d'air dans le caisson chassait ce mélange dans la galerie. Cette opération fut poursuivie jusqu'à ce qu'il y eût un mur de vase de 6 pieds (1,83 m.) d'épaisseur. La fouille fut alors attaquée par le haut. Par précaution une sorte de masque en bois, poussé par des vérins hydrauliques soutenait la partie haute pendant l'exécution du déblai dans le bas. Lorsque la fouille avait réduit le mur de vase à une épaisseur insuffisante pour protéger les ouvriers contre l'eau, il était reconstitué par le même procédé. Quelquefois ce mur s'amincissait brusquement par places et l'air en s'échappant le perçait de trous. La hauteur de 18 pieds (5,50 m.) du souterrain faisait que la poussée de l'eau était beaucoup plus forte en bas qu'en haut, tandis que la pression d'air était uniforme; en outre, la pression de l'eau variait de

2 pieds 1/2 (0,76 m,) par suite des marées. Il y eut de fréquentes pertes d'air; dès qu'un trou se formait, on le bouchait avec une bonne poignée de vase mélangée de sciure de bois toujours tenue à la portée de la main. Si la fuite ne pouvait être étanchée, l'air s'échappait jusqu'à ce que, la pression baissant, ce fût l'eau qui fût la plus forte; alors c'était l'eau qui rentrait. Quand les pressions s'équilibraient, l'eau entrait en même temps que l'air s'échappait, comme lorsqu'on vide une carafe. On traversa ainsi toute la partie voûtée. Arrivés au bout de la maçonnerie, les hommes fouillèrent au-dessus de l'intrados, sur l'épaisseur de 2 pieds (0,61 m.) de la maçonnerie, pour atteindre les plaques posées avant l'accident. Il y avait 4 anneaux non terminés et munis seulement des plaques supérieures. Par élargissement successif et en boisant avec soin la face et les côtés, ils furent complétés. L'avancement put être repris et atteignit les fondations du mur du quai qui étaient disloquées et par où la communication s'était établie avec la rivière. On voyait les bulles d'air s'échapper à travers les pierres du blocage. Les poutres de fondation du mur qui faisaient saillie dans la fouille furent enlevées morceau par morceau et l'obstacle put être franchi, non sans peine.

Système pilote. — Tout était remis en état et rien ne s'opposait plus à la reprise du travail. Mais l'expérience avait montré l'insuffisance des procédés employés, puisque les deux souterrains avaient été arrêtés dès qu'ils avaient approché de la rivière. Pour éviter de nouveaux accidents, M. Andersen inventa le système pilote.

L'attaque du front de taille se fit au moyen d'une galerie tubulaire dite « pilote » (fig. 76 et 77) dont l'extrémité était poussée à 10 pieds (3,05 m.) au delà de l'avancement. Ce tube avait 6 pieds (1,83 m.) de diamètre. Il se composait d'anneaux métalliques de 4 pieds (1,22 m.) de longueur, formés de segments de 3/8 pouce (0.01 m.) d'épaisseur et 2 pieds (0.61 m.) de longueur entourés de cornières à ailes de 3 pouces (0,076 m.) destinées à les réunir entre eux. Tous les deux anneaux, on boulonnait entre les segments un cercle métallique plat de 1 pied (0,30 m.) de largeur et un 1/2 pouce (0,013 m.) d'épaisseur qui faisait saillie à l'extérieur et avait

pour but de renforcer le tube et de découper les joints. En outre de ces plaques de joints transversales qui empêchaient tout déplacement longitudinal du pilote, il y avait des plaques de joints longitudinales dont le principal objet était de servir de points d'appui aux étaiements de la galerie à pleine section.

L'élargissement suivait en effet le pilote; les plaques de revêtement, aussitôt après leur pose, étaient étayées avec des poutres appuyées contre les plaques de joints longitudinales du pilote. Ce dernier supportait ainsi tout le revêtement métallique jusqu'à l'exécution de la maçonnerie. Celle-ci suivait de près, de sorte que la longueur du tube-pilote ne dépassait pas 50 pieds (15,24 m.) environ, dont 10 pieds (3,05 m.) pour l'avancement et 35 à 40 pieds (10,67 m. à 12,19 m.) sur l'étendue du chantier. Dès que la maçonnerie était montée à une certaine hauteur, avant même le clavage, le pilote devenait inutile; il était démonté et les anneaux pouvaient resservir à l'avancement.

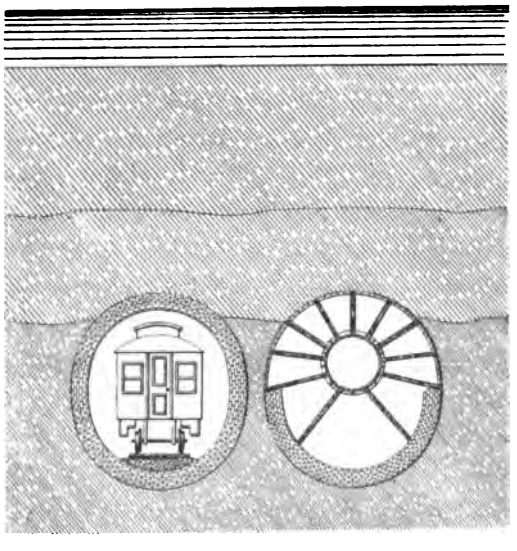


Fig. 77. — Coupe en travers du souterrain et du pilote.

Les déblais étaient chargés dans des wagons, qui étaient ensuite remorqués vers le sas au moyen d'un câble métallique. Ce dernier s'enroulait sur un tambour mû par une petite machine à vapeur dont l'échappement se faisait dans le puits à l'extérieur. Arrivés près du sas, les wagons basculaient automatiquement, les roues d'arrière moins larges que celles d'avant s'engageant sur un plan incliné. La vase tombait dans un puisard où elle était diluée dans l'eau et chassée à l'extérieur au moyen d'un tuyau par l'effet même de la pression. Les matériaux, briques, ciments, bois, etc., étaient

amenés sur une seconde voie. Quant aux déblais provenant du pilote, ils étaient roulés en brouette jusqu'à l'entrée et vidés dans les wagons.

Modifications du système. — M. Sooy Smith. — Le travail fut poursuivi dans ces conditions dans la galerie Sud jusqu'en 1881, époque à laquelle M. Sooy Smith prit la direction des travaux. Cet ingénieur apporta d'assez nombreuses modifications.

Le pilote, étant maintenu à environ 0,60 m. au-dessus de l'axe pour faciliter le travail en dessous, il était très difficile d'arriver à une implantation exacte ; il le mit exactement dans l'axe. Le pilote cédait quelquefois sous les étais, il en renforça les plaques et les nervures. Les éboulements, qui se produisaient fréquemment au front de taille, entraînaient des mouvements dans les anneaux en construction et déplacaient les plaques ; il fit maintenir contre le front de taille un blindage solidement butonné. Il restait des vides dans la fouille en dehors de plaques, qui cédaient ensuite sous la charge de la maçonnerie en produisant des tassements et des fissures ; il fit couler sous les plaques du bas une couche de béton bien pilonné, sur lequel étaient appliquées les plaques de revêtement. Grâce à toutes ces mesures, il espérait pouvoir mieux suivre l'alignement et fit reprendre l'avancement horizontalement pour regagner l'excès de pente dû aux tassements.

Il modifia et renforça également le revêtement du souterrain. Les plaques métalliques furent plus résistantes ; la partie inférieure du revêtement en maçonnerie se fit en béton. Quant à la partie supérieure, il employa d'abord un cours de 5 pouces (0,13 m.) de blocs d'asphalte doublés de briques ; puis, comme disposition définitive, il adopta 3 rangs de blocs de béton avec un revêtement de blocs d'asphalte de 6 × 6 × 16 pouces (0,15 m. × 0,15 m. × 0,41 m.). Le travail se faisait beaucoup plus vite qu'avec la brique : il était plus solide et imperméable à l'air.

L'évacuation du déblai par la pression de l'air devenait plus difficile. M.Smith y substitua une pompe à sable Eads, avec éjecteur hydraulique, alimenté par une pompe Worthington. La vase était jetée sur une grille, mélangée avec l'eau, aspirée dans une trémie par la pompe et expulsée directement au dehors. Il en

résultait une économie de main-d'œuvre, qui permettait de mettre plus de monde à l'avancement.

M. Sooy Smith reconnut enfin la nécessité de construire des sas dans les galeries mêmes. Au moment où ce travail fut fait, la galerie Sud avait 450 pieds de longueur (137,15 m). et la galerie Nord 448 pieds (136,55 m.). Il devenait nécessaire, en raison de la pente, d'avoir à l'avancement une pression beaucoup plus élevée que la pression hydrostatique dans les parties hautes près du puits, notamment dans la galerie Sud qui, par suite des tassements, se trouvait 5 pieds (1,52 m.) trop basse. En outre, les pertes, à travers les briques poreuses dans une chambre à air aussi longue, devenaient importantes. Il fit construire dans les deux galeries, à 425 pieds (129,54 m.) du puits, des cloisons en briques de 4 pieds (1,22 m.) d'épaisseur, renforcées par des poutres encastrées dans la maçonnerie du souterrain. Dans chacune de ces cloisons furent placés deux sas à air, assez grands pour contenir chacun tous les ouvriers occupés à l'avancement; l'un de ces sas, destiné à servir de refuge en cas d'accident, restait toujours ouvert du côté du front de taille. La grande sécurité qui en résultait, justifiait l'excédent de dépenses. Cependant, quand on installa dans le tunnel Nord pour graduer la pression, une seconde cloison à 280 pieds (85,34 m.) de la première et par suite à 705 pieds (214,88 m.) du puits, on n'y mit qu'un sas. A ce moment, le mouvement des terres était assez lent pour donner la confiance qu'avec du sang-froid les hommes auraient tout le temps de gagner la première écluse. Néanmoins s'il y avait eu une irruption d'eau, et si les hommes avaient perdu la tête, un grave accident aurait pu se produire.

Quand ces cloisons eurent été construites, le 17 août 1881, la partie entre le puits et la première cloison fut laissée à l'air libre. Mais contrairement aux prévisions, la pression tomba très lentement. Quand les ouvriers pénétrèrent dans la galerie Sud, ils remarquèrent qu'à 65 pieds (19,81 m.) de la cloison, 490 pieds (149,35 m.) du puits, les boulons travaillaient, et ils reconnurent que la pression tombait par suite de pertes d'air, dues au défaut d'étanchéité de la cloison, quoique les compresseurs donnassent à toute vitesse. Il fallut refermer le sas du puits pour étancher les fuites. Cette fausse manœuvre entraîna la chute de quelques

plaques et la galerie se remplit de vase sèche. Quand elle fut bien tassée, le travail put être repris.

En mai 1882, le travail se poursuivait avec une pression de 30 à 35 livres (2,1 kg. à 2,5 kg.) à l'attaque et de 20 à 25 livres (1,4 kg. à 1,8 kg.) entre les deux cloisons. L'avancement était de 3 pieds (0,91 m.) à 3 pieds 10 pouces (1,17 m.) par jour. En mars, un léger accident s'était produit. Quelques plaques de toit avaient cédé, de manière qu'il ne restait plus de place pour la maçonnerie. Le blindage fut simplement consolidé par une maçonnerie provisoire, et l'exécution du revêtement définitif n'eut lieu que lorsque l'avancement fut à 20 à 30 pieds plus loin, et que la vase fut assez tassée sous la pression de l'eau pour pouvoir reprendre le travail sans danger. A partir de ce moment, l'épaisseur du revêtement fut portée de 24 (0,61 m.) à 30 pouces (0,76 m.) en raison de la plus grande profondeur. L'avancement atteignait 562 pieds (171,29 m.) dans la galerie Sud, où il avait été arrêté, faute de facilités pour évacuer les déblais, et 960 pieds (293,60 m.) dans la galerie Nord. Le mode d'évacuation des déblais n'était plus le même. A partir de la cloison la plus voisine de l'attaque, les wagons étaient remorqués par des chevaux, qui les amenaient jusqu'au puits, d'où ils étaient montés par une grue. Les chevaux supportaient très bien la pression de 20 livres (1,4 kg.) entre les deux cloisons.

Ce moyen plus rapide d'évacuation ne put toutefois être appliqué que lorsque les galeries eurent été définitivement réunies au puits en décembre 1881. Ce travail était très délicat, car, par suite des nombreux bouleversements antérieurs, le terrain n'était plus qu'un mélange de cendres et de vases sans consistance. Dès que la fouille du bas fut attaquée, l'eau monta tout à coup ; mais, en augmentant la pression et en mettant une charge de vapeur sur le tuyau vertical du puisard, la maçonnerie put être achevée et soudée à la paroi du puits. On put alors démolir cette dernière et enlever les sas.

Côté New-York. — Du côté de New-York, le travail fut commencé en 1881. Profitant de l'expérience acquise du côté de New-Jersey, M. Smith descendit de suite un caisson. Ce dernier traversa

(fig. 78) sur 12 pieds (3,66 m.) un terrain formé de décombres, puis une boue noire sur 22 pieds (6,70 m.), enfin sur 215 pieds

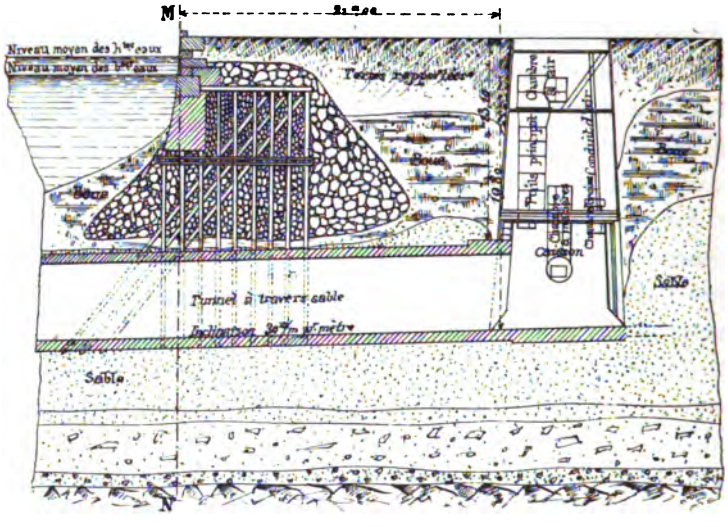


Fig. 78. — Coupe en long du souterrain et du caisson. — Côté New-York.

(6,55 m.) du sable contenant environ 15 p. 100 d'argile, mais recoupé par un lit de galets et de gravier de 6 pieds (1,83 m.)

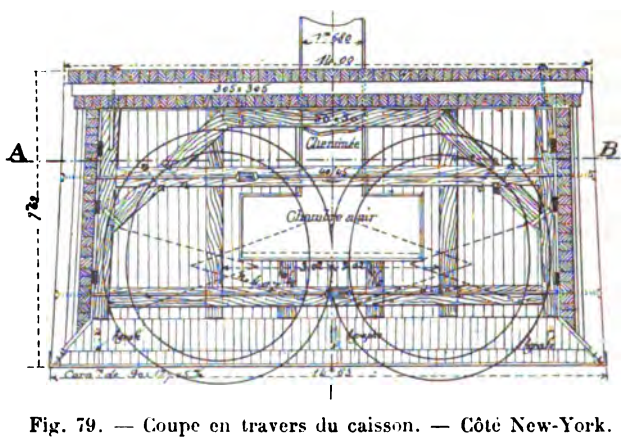


Fig. 79. — Coupe en travers du caisson. — Côté New-York.

d'épaisseur. On atteignit une profondeur totale de 55 pieds 1/2 (16,91 m.).

Le caisson (fig. 79 à 82) avait 48 pieds (14,63 m.) de longueur,

29 pieds 1/2 (9,00 m.) de largeur et 25 pieds (7,62 m.) de hauteur, hors œuvre. Il était dressé avec un fruit d'un 1/2 pouce par pied

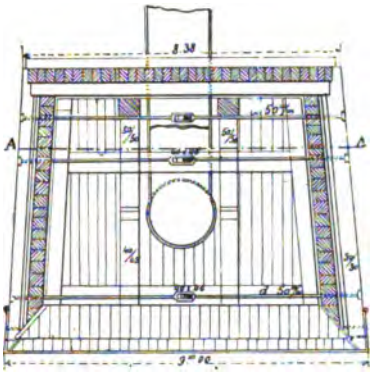


Fig. 80. — Coupe en long du caisson. Côté New-York.

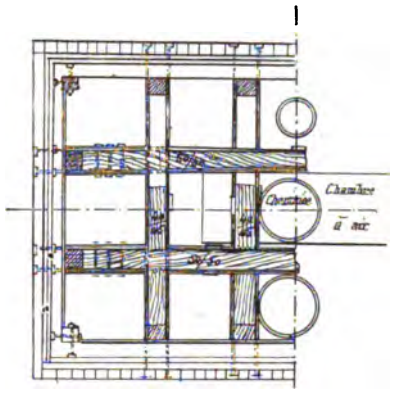


Fig. 81. — Coupe du caisson suivant AA de la figure 80.

(1/24). Il avait été exécuté entièrement en bois, solidement boulonné et entretoisé. Il pesait environ 400 t. (363 000 kg.). En raison des frottements et de l'effort de soulèvement dû à l'air comprimé, il fallut, pour le faire descendre, le charger en outre de 2 500 t. (2 270 000 kg.), avec des vieux rails, des briques et des terres de déblai.

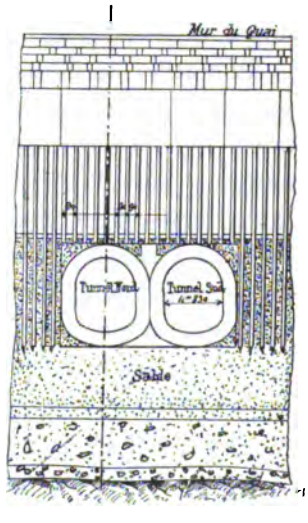


Fig. 82. — Coupe du souterrain suivant MN de la figure 98.

Il y avait 3 sas à air : 1° une cheminée se terminant dans le bas par une chambre à air horizontale de 6 pieds (1,83 m.) de diamètre, placée en T, servait à l'évacuation des déblais au moyen d'un petit treuil à vapeur; 2° une cheminée de 5 pieds (1,52 m.) de diamètre était destinée à l'entrée des ouvriers, qui pénétraient par une écluse horizontale de 6 pieds (1,83 m.) branchée sur la partie haute convenablement élargie. Enfin les matériaux pouvaient être introduits par une cheminée spéciale.

La descente fut très délicate en raison de la nature du terrain et de la proximité d'un égout et de la digue de quai. On creusait une

rigole au-dessous du couteau, puis on provoquait la descente en laissant tomber la pression. L'asséchement se faisait, soit à l'aide d'un tuyau de 4 pouces (0,10 m.) par le simple effet de la pression, soit par une pompe centrifuge qui refoulait l'eau au dehors. Quand le caisson fut à fond, un radier en maçonnerie fut établi sur des plaques de tôle. La maçonnerie fut immédiatement montée pour deux souterrains, au lieu de faire une arche unique pour les deux voies comme sur l'autre rive. Dans le mur séparatif furent insérés 3 tuyaux verticaux de 1 pied (0,30 m.) de diamètre, remplis de pierres cassées, qui sortaient de puisards à pierre sèche sous le radier. On espérait, à l'aide de ces tuyaux, pouvoir assécher le front d'attaque.

La grosse question était de savoir ce que donnerait le procédé Haskin dans les sables et graviers, que le souterrain devait traverser sur environ 400 pieds (152 m.). La paroi Ouest du caisson fut attaquée à l'emplacement de la galerie Nord en y forant des trous de 2 pouces (0,05 m.) sur tout le périmètre du souterrain à ouvrir et en insérant des tôles de 18 pouces (0,45 m.) au lieu de la dimension de 24 pouces (0,61 m.) adoptée sur l'autre rive ; on put alors enlever la cloison et commencer la fouille. Cette première opération réussit assez bien parce que le caisson avait entraîné avec lui une couche de vase moins perméable que le sable ; mais, dès que la fouille eut atteint le sable, il fallut blinder le front d'attaque ; l'emploi d'un masque en bois, rendu imperméable avec de la vase fut sans effet et il devint indispensable de le remplacer par un masque métallique, solidement buté, et de ne laisser à découvert que de très petites surfaces à la fois. Malgré ces précautions, l'eau et le sable envahirent plusieurs fois la galerie en disloquant le revêtement.

Le 16 mai 1882, au moment où M. Sooy Smith se retira, la galerie avait une longueur totale de 20 pieds (6,10 m.) dont 12 (3,66 m.) avec le revêtement en maçonnerie de 2 pieds (0,61 m.) d'épaisseur complètement terminés.

Nouvelle entreprise. — A cette date, M. Sooy Smith fut remplacé par MM. S. Finch et C. W. Raymond.

Le travail se poursuivit quelque temps avec régularité ; au pre-

mier juillet, du côté New-Jersey, la galerie Nord atteignait 1 100 pieds (335,27 m.) ; du côté New-York, elle avait été avancée de 20 pieds (6,10 m.) et n'était plus qu'à 38 pieds (11,58 m.) de la rivière ; une cloison avec sas à air avait en outre été construite à 30 pieds (9,14 m.) du caisson. Le travail dans ce terrain de sable était des plus délicats; il fallait blinder la face avant avec des plaques analogues à celle du revêtement, étayer le tout très fortement, et avancer le revêtement plaque par plaque avec le plus grand soin. Néanmoins le 21 août, au moment où un anneau était à moitié maçonné, il se produisit une violente perte d'air, l'eau envahit le souterrain et les ouvriers n'eurent que le temps de s'échapper. Le lendemain on parvint à ouvrir la porte du sas et un scaphandrier visita la galerie. La maçonnerie était intacte, mais les plaques du toit avaient cédé. Il fallut boucher toutes les fuites avec des sacs de sciure de bois, avant de pouvoir mettre à sec et pénétrer. Des accidents analogues se produisirent à diverses reprises.

Du côté de New-Jersey, dès que pour une cause quelconque, la pression n'était pas en équilibre, l'eau forçait sur le revêtement, ou la vase desséchée s'effritait et s'éboulait ; mais, de ce côté, quoiqu'on marchât vers la partie profonde de la rivière, les accidents n'avaient pas la même gravité et, au 11 novembre 1882, la galerie Nord était terminée sur une longueur de 1 542 pieds (470 m.), tandis qu'elle n'était qu'à 74 pieds (22,55 m.) du côté de New-York. La galerie Sud était toujours abandonnée à moins de 600 pieds (183 m.) du côté de New-Jersey et n'avait pas été attaquée sur l'autre rive.

Arrêt momentané. — Au mois de novembre 1882, les dépenses s'élevaient à 1 500 000 dollars (7 500 000 fr.) ; la Compagnie, ayant épuisé ses ressources, dut suspendre les travaux et se borna à maintenir la pression, pour éviter que les galeries ne fussent envahies par l'eau, et à faire quelques menues dépenses d'entretien. Ce n'est qu'en 1889 que des fonds purent être trouvés en Angleterre et que l'on put reprendre le travail.

La Compagnie anglaise avait pour ingénieurs conseils Sir John Fowler et Sir Benjamin Baker, et pour entrepreneurs MM. Pearson and Sons. Pendant quelques mois, elle continua par les procédés

anciens. Mais, du côté de New-York, le feu se déclara dans le caisson. Lorsqu'il eut été noyé, des scaphandriers purent y descendre et reconnurent que le feu avait causé de graves désordres ; l'air et l'eau passaient à travers les boisages disloqués, et il fallut un long et pénible travail pour l'étancher. En raison de toutes ces difficultés, l'avancement qui était arrivé à une distance d'environ 200 pieds (61 m.) du caisson fut muré et le travail momentanément abandonné.

Du côté New-Jersey, le travail dans la vase compacte se poursuivait dans de meilleures conditions. On était arrivé à boucher une communication qui s'était faite avec la rivière, en immergeant, à l'aide d'une grue flottante, une grosse masse de pierres et de briques entourée de bottes de foin et enveloppée dans de la toile à voile attachée avec des cordages métalliques, et en chargeant le tout de pierres. Il y eut néanmoins plusieurs éboulements, et dans l'un deux, en janvier 1890, un homme fut sérieusement blessé. Plus la galerie avançait, et plus la profondeur d'eau dans la rivière augmentait au détriment de la couche de vase, qui seule protégeait l'ouvrage. Il devenait très dangereux de continuer dans ces conditions ; si la pression baissait, l'eau menaçait de se faire jour et d'établir une communication avec la rivière ; si elle était forcée, la vase se desséchait, s'effritait et s'éboulait, ce qui pouvait entraîner les mêmes conséquences.

La Compagnie résolut par suite, quand on fut arrivé à 2 050 pieds (624,83 m.) d'appliquer la méthode du bouclier et d'employer un revètement en fonte.

Le bouclier. — Le diamètre extérieur du bouclier était de 19 pieds 11 pouces (6,07 m.) et sa longueur de 10 pieds 6 pouces (3,20 m.) (fig. 83, 84, 85).

Il se composait d'une enveloppe cylindrique en tôle d'acier, en deux épaisseurs de 5/8 pouce chacune. La première couche était assemblée avec des couvre-joints intérieurs de même épaisseur dans l'intervalle desquels se plaçaient les feuilles de la seconde couche. Le tout était assemblé avec des rivets à tête fraisée, de manière à présenter une surface entièrement lisse. A 5 pieds 8 pouces (1,73 m.) en arrière de l'arête tranchante, se trouvait

une cloison verticale, formée également de tôles de 5/8 pouce (0,016 m.) d'épaisseur, renforcée par six poutres verticales de

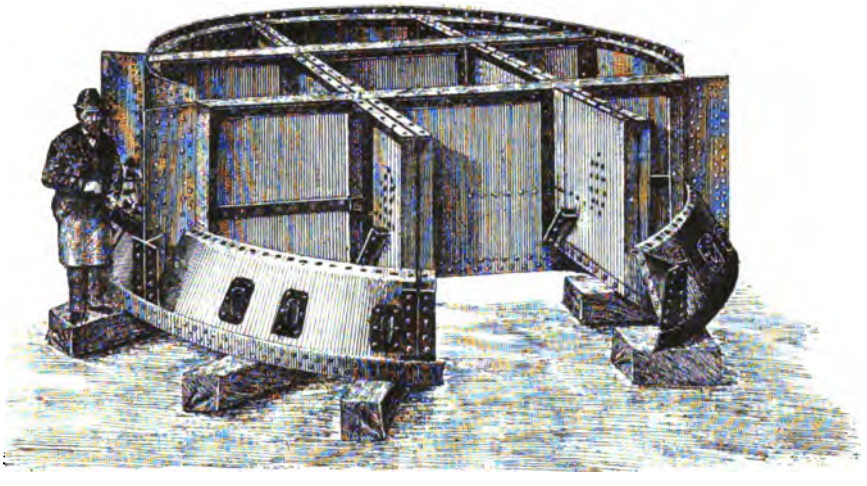


Fig. 83. — Montage du bouclier. — Vue avant la pose de l'enveloppe.

6 pouces 1/2 (0,16 m.) de hauteur, composées d'une âme d'un 1/2 pouce (0,013 m.), d'une semelle de même épaisseur et de

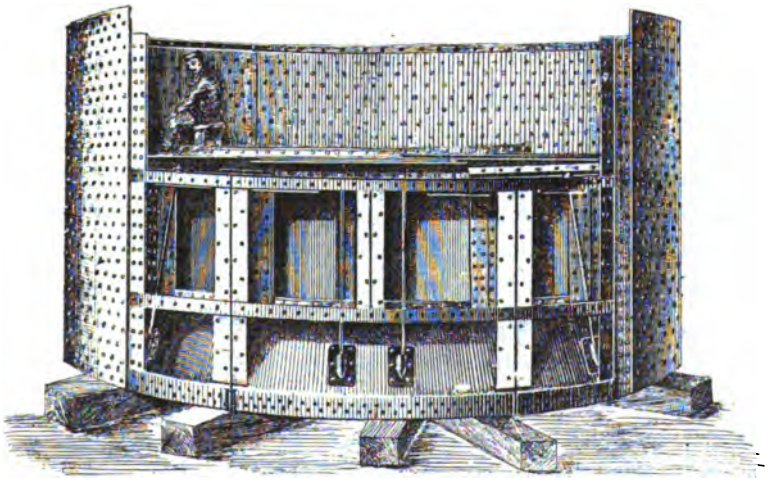


Fig. 84. — Montage du bouclier. — Pose de l'enveloppe.

6 pouces 1/2 (0,16 m.) de largeur assemblées avec des cornières 4 pouces 1/2 × 3 pouces × 1/2 pouce (0,11 × 0,076 × 0,0127 m.).

En avant de cette cloison, il y avait deux planchers horizontaux, s'étendant jusqu'à l'arête tranchante, formés d'une double épaisseur de tôles d'un 1/2 pouce (0,0127 m.) réunies à la cloison séparative et aux cloisons verticales, dont il va être parlé, par des cornières 6 pouces × 6 pouces × 3/4 pouce (0,15 × 0,15 × 0,019 m.). Il existait également deux divisions verticales d'un 1/2 pouce (0,0127 m.) d'épaisseur réunies aux autres parties du bouclier par des cornières 4 pouces × 4 pouces × 1/2 pouce (0,10 × 0,10 × 0,0127 m.).

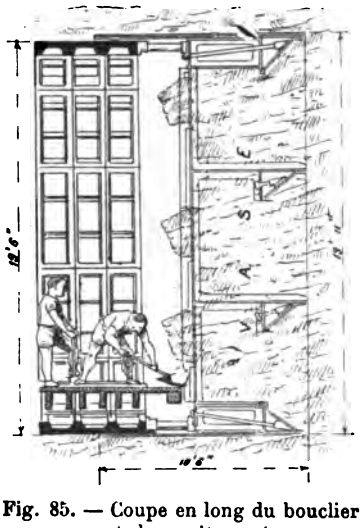


Fig. 85. — Coupe en long du bouclier et du revêtement.

Dans l'avant-bec, depuis la cloison séparative jusqu'à 2 pieds 4 pouces (0,76 m.) de l'arête tranchante, des tôles d'acier d'un 1/2 pouce (0,0127 m.) d'épaisseur formaient une seconde enveloppe cylindrique éloignée de 1 pied 5 pouces (0,43 m.) de la première, à laquelle elle était réunie par 16 cloisons de 3 pieds 2 pouces (0,97 m.) de longueur, 1 pied 5 pouces (0,43 m.) de largeur, assemblées avec des cornières 4 pouces × 4 pouces × 1/2 pouce (0,10 × 0,10 × 0,0127 m.).

Les deux divisions horizontales et les deux divisions verticales partageaient l'avant-bec en 9 cellules auxquelles correspondaient 9 portes dans la cloison, 7 rectangulaires de 2 pieds 6 pouces (0,76 m.) sur 2 pieds (0,61 m.) à 2 pieds 3 pouces (0,69 m.), et les deux dernières en haut triangulaires de 2 pieds (0,61 m.) de côté. Les portes étaient en tôle de 5/6 pouce (0,016 m.) et garnies tout autour d'une lame de caoutchouc de 1/4 pouce (0,006 m.) d'épaisseur.

Seize vérins hydrauliques, également espacés sur la circonférence se trouvaient placés entre les deux enveloppes. Ils avaient 3 pieds 4 pouces 1/2 (0,11 m.) de longueur, un diamètre extérieur de 10 pouces 3/4 (0,27 m.) et un diamètre intérieur de 8 pouces (0,20 m.). Les pistons avaient 3 pouces 1/2 (0,09 m.) de diamètre.

Ces vérins étaient essayés à une pression de 2 t. par pouce carré de surface de piston (283 kg. par centimètre carré) et pouvaient développer chacun un effort de 100 t. (907 185 kg.).

Grue de montage des segments. — Il a été dit que M. Great-

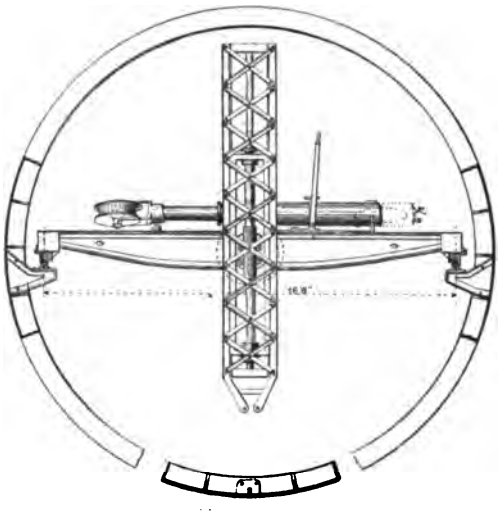


Fig. 86. — Elévation.

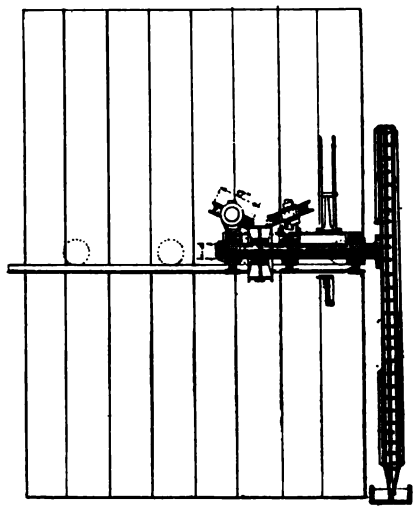


Fig. 88. — Coupe longitudinale.

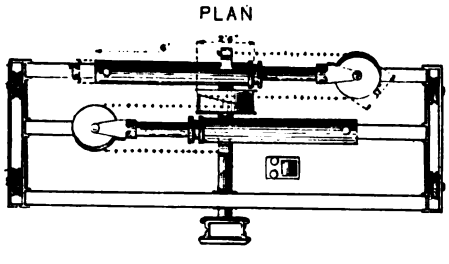


Fig. 87. — Plan.

head avait prévu une grue de cette nature en 1876 pour le souterrain de Woolwich. Celle de l'Hudson a été la première réellement construite.

Elle se composait de trois presses hydrauliques montées sur un bâti roulant sur des rails posés sur des tasseaux fixés aux nervures du revêtement, exactement sur le diamètre horizontal du souterrain. Ce bâti se composait de trois poutres horizontales, réunies à leurs extrémités par une poutre à laquelle étaient attachés les galets de roulement. Sur le bâti on trouvait d'abord deux presses hydrauliques en fonte de 6 pieds (1,83 m.) de longueur et 6 pouces 1/2 (0,165 m.) de diamètre. Les pistons plongeurs

portaient des poulies de 17 pouces de diamètre (0,43 m.). Un axe horizontal de 7 pouces (0,18 m.) de diamètre traversait le bâti dans son milieu ; il portait un large tambour de 2 pieds 1/4 (0,69 m.) de diamètre, claveté entre les deux presses. Chaque presse portait une oreille, venue de fonte, à laquelle s'attachait une chaîne qui passait sur les poulies et le tambour, ce qui permettait de faire tourner l'axe dans un sens ou dans l'autre.

A l'extrémité de l'axe et perpendiculairement à lui était monté un vérin dont le piston pouvait se mouvoir dans les deux directions et qui avait pour objet de monter ou d'abaisser un bras en forme de poutre à treillis, qui se terminait par quatre bras convergents pour saisir les segments.

Cet appareil pouvait prendre un segment, le soulever en raccourcissant le bras, l'amener en tournant en face de sa position sur la circonférence et en allongeant le bras le mettre à sa place.

La grue de montage, comme le bouclier, avait été construit par M. Arrol de Glasgow.

Revêtement métallique. — Le revêtement métallique en fonte avait 19 pieds 6 pouces (5,94 m.) de diamètre extérieur et environ 18 pieds (5,48 m.) de largeur libre dans œuvre comme la maçonnerie à laquelle il faisait suite.

Chaque anneau de 18 pouces (0,457 m.) se composait de neuf segments de 1 pouce 1/4 (0,032 m.) d'épaisseur, avec des nervures de 1 pouce 1/2 d'épaisseur (0,038 m.) et de 7 à 9 pouces (0,18 m. à 0,23 m.) de hauteur. Les cinq segments du bas pesaient 10 1/2 cwt (533,43 kg.) chacun; ils étaient suivis à droite et à gauche d'un segment de 8 cwt (406,42 kg.), puis d'un de 7 1/2 cwt (381 kg.). Enfin, au sommet, on plaçait une clef pesant 2 cwt (116 kg.). Le poids total était donc de 85 1/2 cwt (4 350 kg.) On verra plus loin que ce poids était au-dessous de la moyenne, aussi y a-t-il eu un assez grand nombre de ruptures sous la poussée des vases.

Les joints horizontaux comportaient une fourrure en bois dur créosoté. Les joints transversaux avaient une portée à l'extérieur et étaient bourrés à l'intérieur avec une corde de chanvre et du ciment de Portland. Ces joints étaient assemblés avec des boulons de 1 pouce 1/4 de diamètre (0,032 m.).

Exécution du travail. — Le montage du bouclier sur place dans un mauvais terrain fut une opération très pénible ; mais, une fois en marche, le travail se fit assez régulièrement, à raison de 7 pieds (2,13 m.) par jour au début, puis de 10 pieds (3,05 m.). La vase était si plastique que, même avec une pression d'air de 35 livres par pouce carré (2,4 kg.), elle sortait naturellement à travers les portes, avec dix fois la vitesse du bouclier; quand il avançait, elle se moulait comme dans un appareil à fabriquer la brique (fig. 85), et, après la course qui durait de 10 à 20 minutes, il n'y avait plus qu'à ramasser les blocs et à les charger en wagon.

L'avancement dans la galerie nord, côté de New-Jersey, vers le mois de juin 1890 à 2050 pieds (624,83 m.), fut poussé en un an à environ 3800 pieds (1158 m.) A ce moment, il était au point bas du souterrain et abordait la rampe de 2 p. 100 vers New-York. Il arrivait à la partie où la rivière avait une profondeur de 60 à 64 pieds (18,29 à 19,51 m.), ne laissant au-dessous du souterrain qu'une faible couche de 5 pieds (1,52 m.) de vase, et les entrepreneurs avaient sollicité l'autorisation de déposer, au fond de la rivière, une couche d'argile pour se protéger, autorisation qu'ils avaient obtenue à condition de ne pas déposer plus de 2000 yards cubiques (1500 m³) d'argile et de ne pas excéder une épaisseur de 15 pieds (4,27 m.).

Malheureusement les 1500000 dollars (7500000 fr.) apportés dans l'affaire par la compagnie anglaise étaient épuisés, et, le 22 août 1891, le travail fut encore une fois arrêté. Il avait été dépensé depuis le commencement 3000000 de dollars (15000000 fr.) pour exécuter environ 4000 pieds (1219 m.). Il restait encore à faire, pour ce seul souterrain à voie unique, sans compter la seconde galerie et les approches, 1600 pieds (487,67 m.) environ de galerie qui étaient estimés 300 dollars par pied (5000 fr. par m.).

Travail à l'air comprimé. — M. Moir, envoyé par le constructeur du bouclier M. Arrol pour suivre le travail, s'est beaucoup occupé des conditions du travail à l'air comprimé. Au moment où il arriva, les hommes mouraient à raison de 1 par mois sur une équipe de 45 à 50 hommes, soit une mortalité de 25 p. 100. Dans le but d'améliorer cette situation, il fit un sas à

air, dans lequel pouvaient être traités les ouvriers malades par l'homéopathie en les replongeant dans l'air comprimé. Ce sas était monté près de la sortie du puits, et, quand un homme était atteint de paralysie, complètement inconscient et incapable de se servir de ses membres, il était apporté dans le sas et soumis à une pression de la moitié ou des deux tiers de celle de la chambre de travail. Il en résultait une amélioration immédiate. On laissait ensuite tomber la pression très lentement, à raison de 1 livre (0,07 kg.) à la minute et même moins, de manière à faire durer la détente de vingt-cinq à trente minutes. Même dans des cas graves, le malade sortait guéri. Le sas de traitement doit être employé de suite ; car, au bout d'un certain temps, il serait sans effet.

M. Moir comparait l'homme dans l'air comprimé à un foyer au tirage forcé. Tout à coup il passe par les poumons trois à quatre fois le volume d'oxygène ordinaire ; le système s'y habitue graduellement et la combustion s'active. Mais, à la sortie, il y a une réduction subite dans la quantité d'oxygène, le tirage forcé est arrêté et, comme dans un foyer, il se produit de l'oxyde de carbone ou du carbone, par suite de l'insuffisance d'oxygène. Ce carbone ou cet oxyde de carbone s'accumule dans le sang, et, quand l'homme sort, il est empoisonné. Cette manière de voir est confirmée par ce fait que, quand l'air est impur, bien au-dessous de la dose respirable, les cas de maladie augmentent. Il est donc nécessaire de fournir l'air en abondance et très pur. Cet effet se manifeste surtout quand il y a à la fois accroissement de la pression et de l'impureté ; mais, au bout d'un certain temps, les hommes semblent s'y accoutumer. L'effet de l'impureté de l'air ne se constate qu'à la sortie. C'est ainsi qu'à New-York, il y eut des mulets qui travaillèrent à l'air comprimé douze mois de suite et se vendirent très bien après leur sortie.

M. Moir pensait aussi que, sous l'effet de la pression, le sang retenait en dissolution une grande quantité d'acide carbonique, comme dans la fabrication des eaux gazeuses ; et, qu'à la sortie les bulles de gaz se dégageaient et arrêtaient la circulation. Il estimait qu'il serait utile de faire passer l'air, qui contient habituellement 0,004 d'acide carbonique, sur un lait de chaux, pour l'en débar-

rasser avant de le comprimer ; avec cette précaution il n'y aurait probablement besoin d'envoyer qu'un moindre cube d'air comprimé par homme. Il vit saigner un homme dont le sang était si épais et si noir qu'il fallait opérer une pression pour le faire sortir, tant il était peu fluide. M. Moir estimait qu'en tout cas, il fallait soumettre chaque homme à l'examen du médecin, avant de l'admettre, et distribuer du café chaud avant la sortie de l'air comprimé; mettre à la disposition des ouvriers une chambre chaude pour s'habiller et un vêtement supplémentaire pour traverser l'écluse.

Après l'introduction du sas de traitement et de toutes ces précautions, le nombre de décès tomba à deux en quinze mois sur une équipe de 120 hommes.

Conclusions. — Le souterrain de la rivière Hudson est surtout remarquable comme étant la première grande galerie exécutée à l'air comprimé.

Il ressort de l'exposé ci-dessus que la méthode simple d'Haskin a été impuissante pour le travail sous la rivière, que le système du pilote d'Andersen a bien permis de faire de l'avancement, mais avec une grande lenteur, puisque M. Smith ne fit qu'environ 1 200 pieds en un an et demi ; qu'enfin la méthode du bouclier permit d'avancer avec beaucoup plus de sécurité et fit plus que doubler la vitesse.

Par contre, le revêtement en fonte paraît avoir été fait trop légèrement ; il se fissura et dut être consolidé avec des tirants provisoires, tandis que la partie exécutée en maçonnerie n'éprouva aucune avarie.

CHAPITRE V

SOUTERRAIN DE LA RIVIÈRE SAINT-CLAIR

(1884-1890)

Exposé. — L'historique du tunnel de la rivière Saint-Clair présente bien des analogies avec celui du souterrain Hudson; dans les deux cas on n'a eu recours au bouclier qu'après de nombreux échecs. Seulement l'ouvrage dont il s'agit ici a été terminé et dans des conditions si brillantes qu'il est universellement connu.

Les produits du marché de Chicago peuvent être dirigés sur les ports de l'Océan Atlantique par deux voies : la voie de l'est, qui passe à travers les plaines au sud du lac Erié et aboutit à New-York, et la voie du nord-est, qui passe entre les lacs Huron et Erié et se dirige vers Montréal et la vallée du Saint-Laurent. Ce dernier tracé doit franchir la rivière Saint-Clair, qui sort du lac Huron, traverse le lac Saint-Clair et vient, sous le nom de rivière Détroit, se jeter dans le lac Erié. Ces rivières sont larges et profondes et ont un courant rapide; la navigation très active représente un trafic supérieur à celui du port de New-York. Pour les franchir, il faudrait un pont d'une seule arche dépassant les travaux les plus hardis et nécessitant des dépenses d'autant plus fortes que la nature du sol des rives aurait obligé à des fondations difficiles et que l'étendue et le niveau des plaines aux abords aurait conduit à allonger considérablement les rampes d'accès.

Le terrain ne paraissait pas non plus favorable à l'exécution d'un souterrain; au-dessous de la vase ou de l'argile molle, il se compose de sable et de gravier, et le rocher ne se trouve qu'à une profondeur trop grande pour s'y établir en admettant même que cette roche offrît quelque chance de succès.

Ces motifs obligèrent pendant longtemps à se contenter d'un ferry boat.

Souterrain de la rivière Détroit. — Chaque année le temps perdu et les dépenses entraînés par le transbordement devenaient plus onéreux. Aussi dès 1867, M. Jas I. Joy, président du Michigan Central Railroad, demanda-t-il à M. E. S. Chesborough d'étudier un souterrain sous la rivière Détroit, entre Détroit et Windsor. En 1872, les travaux furent commencés; le souterrain devait avoir 8 000 pieds (2 438 m.) dont 3 000 (915 m.) sous la rivière; il devait être établi avec un diamètre intérieur de 18 pieds 1/2 (5,64 m.) avec un revêtement en maçonnerie de briques de 24 pouces (0,61 m.) d'épaisseur et devait être drainé par une petite galerie de 5 pieds de diamètre (1,52 m.), placée sous l'axe du souterrain. On pensa agir sagement en commençant par le percement de cette galerie. Mais le travail fut arrêté à diverses reprises par des irruptions de sable et d'eau, à des pressions de 100 pieds (30,48 m.), supérieures à la charge hydrostatique de la rivière. Il fut poursuivi jusqu'à 1 220 pieds (371,85 m.) sur la rive américaine ou de Détroit et jusqu'à environ 450 pieds (137,16 m.) sur la rive Canadienne ou de Windsor. Mais à ce moment les dépenses étaient de plus de six fois et demie plus élevées que le montant du projet total. M. Chesborough déclara qu'avec une pareille pression il était impossible de recourir à l'air comprimé et que la méthode du bouclier, tel qu'il avait été employé à Chicago au lac Cleveland, ne permettait pas d'avoir une direction régulière. Il n'était que l'interprète d'une opinion qui a été signalée ci-dessus et dont l'avenir devait montrer le peu de fondement. Quoi qu'il en soit, les directeurs estimèrent qu'à continuer le travail dans les mêmes conditions, ils seraient conduits à des dépenses hors de proportion avec les bénéfices à espérer de l'opération.

Grand Trunk Railway system. — La Compagnie de Michigan Central Ry n'est pas la seule qui assure le trafic de Chicago avec la vallée du Saint-Laurent. Il existe une seconde traversée de la rivière Saint-Clair près de la sortie du lac Huron, à 60 miles (96,560 m.) au nord de Détroit. Sur la rive ouest de la rivière

Saint-Clair, à Port-Huron, aboutissent quatre lignes de chemin de fer; la plus importante est le Chicago and Grand Trunk Railway qui enlève les produits de Chicago sur un réseau de 4 100 milles (6 598 km.) d'étendue. A l'est se terminent les deux lignes du réseau canadien du Grand Trunk : l'une va directement à Toronto et Montréal et l'autre (l'ancien Grand Western Railway) va à la rivière Niagara, où elle se soude aux lignes de New-York.

Le relevé des revenus bruts et du nombre de tonnes et de voyageurs par mille en 1884 et 1889, sur le Chicago and Grand Trunk Railway

	1884		1889
Revenus bruts par mile. . . .	9 368	dollars	10 082
Nombre de voyageurs par mile.	184 352	—	184 283
Tonnes de marchandises —	1 135 477	—	1 169 306

montre que ce trafic très lourd, surtout pour les marchandises, restait stationnaire. Cela tenait à la traversée de la rivière, qui se faisait en un point rétréci, où le courant très violent varie de 4 à 7 milles à l'heure (6,4 km. à 11,3 km.); l'activité très grande de la navigation et le choc des glaces en hiver rendait la traversée très difficile et très lente; il ne fallait pas moins d'une demi-heure pour opérer le passage des trains de voyageurs.

En 1888, le nombre total de voitures et de wagons transbordés s'est élevé à :

Wagons à marchandises de toutes sortes	296 908
Voitures à voyageurs	27 667
Fourgons et wagons-postes	7 920
Total. . . .	332 495

soit une moyenne de 1 004 par jour, en comptant les dimanches, pour un tiers seulement.

L'importance de cette traversée pour le Grand Trunk Railway s'était surtout fait sentir depuis qu'il avait réuni à son réseau le Chicago and Grand Trunk et qu'il était devenu un concurrent très sérieux des autres compagnies, pour le trafic de Chicago avec les ports de l'Atlantique. Malgré l'échec désastreux du tunnel de la rivière Détroit et quoiqu'il fût bien probable que les difficultés eussent été les mêmes sous la rivière Saint-Clair, les directeurs de la compagnie commencèrent les études d'un souterrain.

En 1882, M. Walter Shanly de Montréal fut chargé d'examiner s'il était possible de faire le travail. Il fit une reconnaissance, mais sans opérer de sondages, et déclara que l'emplacement le plus favorable pour un souterrain était Port-Huron à 3 milles (4,8 km.) au sud du « ferry-boat » actuel.

Une compagnie fut constituée en 1884, sous la présidence de M. Joseph Hickson, directeur du Grand Trunk et avec M. Joseph Hobson, ingénieur en chef de la division ouest du Grand Trunk, comme ingénieur en chef. M. Hobson reprit les études sur le choix de l'emplacement et reconnut que le meilleur était bien celui désigné par M. Shanly. En ce point les deux lignes rejoignent les rives est et ouest et font ensuite un détour de 3 milles au nord jusqu'à l'emplacement du ferry. Le souterrain procurerait donc un raccourcissement de 6 milles (9,6 km.). Cet emplacement fut donc définitivement adopté.

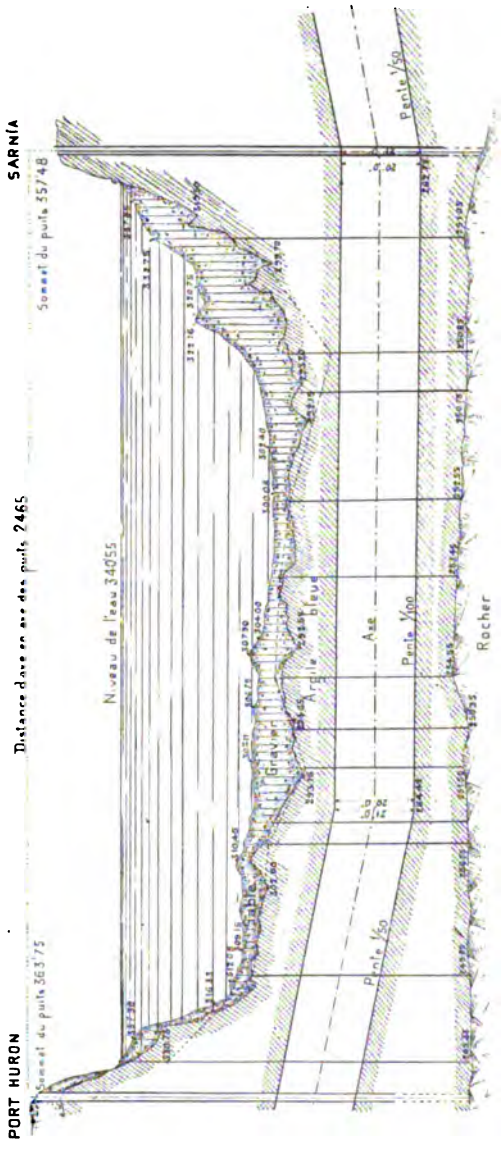


Fig. 89. — Profil en long et coupe géologique.

Des sondages furent entrepris en 1885 afin de déterminer avec précision la nature des terrains à traverser. Pour ne pas désagréger le sol à l'emplacement de l'ouvrage, les trous de sonde furent faits sur une ligne parallèle à son axe et à 50 pieds (15,24 m.) plus au sud. Pour opérer dans la rivière, on se servit d'un chaland solidement amarré avec des câbles dans plusieurs directions; à l'aide d'une sonnette, on descendait des tubes en fer de 6 pouces (0,152 m.) à travers le sable et le gravier jusqu'à l'argile. Ces tubes étaient formés de tronçons de 12 pieds (3,66 m.) de longueur, assemblés par des écrous. On opérait le sondage à l'intérieur de ces tubes, avec autant de facilité et d'exactitude qu'en dehors du lit de la rivière.

Le profil ci-joint (fig. 89) donne la coupe du rocher qui se trouve sous l'argile, et en pointillé la ligne de l'argile, telle que la donnait les sondages de 1885. Mais ces sondages ne pouvaient donner qu'une indication grossière en raison de leur espacement et de leur nombre réduit à onze seulement dans le lit de la rivière.

Les résultats de ces sondages n'étaient pas encourageants. Le terrain se présentait exactement dans les mêmes conditions qu'à Détroit, et il fallait s'attendre à rencontrer les mêmes difficultés qui avaient obligé à abandonner le souterrain en ce point, après les tentatives les plus acharnées et les plus coûteuses. La couche d'argile, qui se trouve sous le lit de sable et de gravier de la rivière, était tout à fait tendre, perméable, imbibé d'eau et certainement très instable.

Travaux préliminaires. — Quand cette situation fut connue, on délibéra sur la méthode à suivre. M. Hobson proposa, avant d'attaquer le souterrain à pleine section, d'exécuter sur toute la longueur une petite galerie dans une position correspondante à la partie la plus élevée de la section du souterrain projeté; il estimait que le percement de cette galerie pourrait seul permettre de se faire une opinion raisonnée sur les difficultés qui pourraient se présenter et la meilleure méthode d'exécution à adopter. Si la petite galerie pouvait être exécutée sans de trop grosses difficultés, le souterrain pourrait être attaqué avec confiance à pleine section; si, au contraire, il se présentait des difficultés insurmonta-

bles, la perte d'argent serait moindre que si l'attaque avait de suite été faite avec les dimensions de l'ouvrage entier. C'était retomber dans l'erreur commise en 1867, à Détroit; il était impossible d'espérer des renseignements bien concluants d'un travail fait par des procédés tout différents, et, en tout cas, c'était commettre une faute que de mettre à l'avance en mouvement le terrain qui devrait être attaqué plus tard avec la pleine section.

En réalité, c'était la lutte entre les vieux procédés et la méthode du bouclier condamné un peu vite par les Américains, à la suite des essais de l'appareil primitif de Beach. Cela est d'autant plus probable qu'à ce moment l'un des directeurs de la Compagnie revenait d'Angleterre, où il avait dû avoir connaissance des efforts faits pour développer l'emploi du bouclier. L'avis de M. Hobson fut adopté et le travail entamé.

Sur chacune des rives, un puits rectangulaire de 6 pieds (1,83 m.) sur 14 (4,27 m.) fut descendu, sur la rive américaine à une profondeur de 60 pieds (18,20 m.) et sur la rive canadienne à 75 pieds (22,86 m.). Au fond de chaque puits, une galerie fut attaquée du côté de la rivière, par les procédés ordinaires, sans bouclier et sans air comprimé ; son exécution se heurta à des infiltrations d'eau considérables, à des écoulements continus de sable mouvant et à des dégagements abondants de gaz dont l'explosion faillit même un jour coûter la vie à plusieurs hommes. Au bout de neuf mois de de lutte opiniâtre, au milieu des plus grands dangers, il fallut reconnaître l'impossibilité de poursuivre dans ces conditions ; la galerie avait été poussée sur la rive américaine à 20 pieds (6,10 m.) et sur la rive canadienne à 186 pieds (56.69 m.)

La Compagnie renonça à poursuivre la galerie et, après avoir solidement blindé les attaques avec des cloisons en bois, on laissa les deux amorces et les puits se remplirent d'eau, en juillet 1887.

Projet définitif. — Au printemps de 1888, les directeurs de la Compagnie décidèrent la reprise des travaux, mais cette fois sur la section entière ; ils en soumirent les projets au Gouvernement Canadien, qui accorda une subvention de 375,000 dollars (1 875 000 fr.), soit 15 p. 100 de la dépense évaluée à 2 500 000 dollars (12 500 000 fr.) En outre, la Compagnie du Grand Trunk

Railway avait promis de garantir les intérêts des avances de la Compagnie du souterrain.

Il y avait lieu avant tout de compléter les sondages faits en 1885 sur une ligne placée à 50 pieds (15,24 m.) au sud de l'axe du tunnel, en opérant cette fois sur l'axe même. Mais, afin de ne pas mettre en mouvement le terrain d'argile, les sondages furent arrêtés à la surface de cette couche. On se servit, comme la première fois, de tuyaux en fer de 6 pouces (0,15 m.) de diamètre enfoncés soit au moyen d'un jet d'eau à la base, soit à l'aide d'une sonnette. Le bateau, amarré par les mêmes procédés que dans la première opération, effectua 110 sondages, espacés de 20 pieds (6,10 m.) les uns des autres. Ce travail fut d'une exécution très difficile, en raison du passage incessant des navires et de l'hostilité des mariniers qui étaient aussi opposés au souterrain que s'il s'était agi d'un pont pouvant causer des entraves à la navigation. A plusieurs reprises des bateaux vinrent toucher la barque et la déranger de son mouillage, ce qui entraînait des retards. Le travail fut néanmoins terminé en juillet 1888, au bout de 70 jours. La dépense totale des 121 sondages de 1885 et de 1888 s'éleva à 5 000 dollars (25 000 fr.)

Les résultats en sont indiqués sur le profil (fig. 89). On peut y remarquer qu'en un point voisin de la rive canadienne, la surface de l'argile avait été trouvée en 1885 à un niveau beaucoup plus bas qu'en 1888. Cette anomalie pouvait avoir eu pour cause la rencontre d'un galet qui aurait été enfoncé avec le tube dans l'argile absolument molle.

A quelle profondeur convenait-il de placer le souterrain? L'épaisseur de l'argile descendait en un point, vers l'axe de la rivière, à 38 pieds (11,58 m.) et le souterrain comportait une fouille de 21 pieds (6,40 m.) de hauteur. Au premier abord, il eût paru naturel de s'enfoncer le plus possible au-dessous de la rivière, et il aurait semblé que la rencontre du rocher était bien moins à craindre que les irruptions d'eau. Mais ici le rocher était de nature schisteuse, et ressemblait beaucoup aux couches dont on tire le gaz combustible dans les contrées voisines ; l'expérience du souterrain de Détroit et de la galerie d'essai prouvait que le gaz pouvait se dégager en grande quantité et causer de graves explosions.

On n'était d'ailleurs pas très sûr du niveau du rocher ; il n'avait été relevé que sur une ligne parallèle à l'axe et par des sondages très peu nombreux et avec d'autant moins de certitude que les couches inférieures d'argile étaient souvent mélangées de rocher. Pour être sûr de ne pas le rencontrer, il fallait donc se tenir à une certaine distance au-dessus du niveau relevé par les sondages. Pour tous ces motifs, on décida de se maintenir dans l'argile, en s'écartant à peu près également des deux zones dangereuses de sable et de rocher. On fixa à 12 pieds (3,66 m.) l'épaisseur moyenne d'argile à réserver tant au-dessus qu'en dessous. Cette épaisseur se réduisait dans les passages les plus difficiles à 8 pieds (2,44 m.) en dessus et à 10 pieds (3,05 m.) en dessous.

Fig. 90. — Plan.

La figure 90 indique la position du souterrain et du ferry-boat qu'il a remplacé ; on voit que le tunnel et les tranchées d'accès sont en ligne droite. D'après le profil, la longueur totale du souterrain est de 2 465 pieds (751,83 m.) dont 518 m. en rampe de 0,001 par mètre sous la rivière. La rampe d'accès sur la rive canadienne a une longueur de (1 528,74 m.) et sur la rive américaine de (1 472,80 m.). Il en résulte que le travail comprenait une longueur totale de (3 519,54 m.). Le souterrain a une pente de 1/1000 vers le puits de la rive canadienne, où les eaux d'infiltration sont récoltées et refoulées par des pompes dans la rivière. Les tranchées d'accès sont tracées avec une pente de 2 p. 100. Le point le plus bas, au puits, est à 100 pieds (30,48 m.) au-dessous du niveau des hautes eaux.

Fonçage des puits. — Ce projet arrêté, on résolut d'attaquer le souterrain par des puits près de la rive et de remettre à une date ultérieure l'exécution des rampes d'accès afin d'éviter une dépense inutile en cas d'insuccès. Les travaux furent commencés le 20 avril 1888. Grâce à de puissantes pompes d'épuisement, le

travail fut mené rapidement et on atteignit 58 pieds (17,68 m.) sur la rive américaine et 90 pieds (27,43 m.) sur la rive du Canada, c'est-à-dire pour ce second puits presque le niveau du radier du souterrain. Mais il fut impossible d'aller plus loin ; l'argile était tellement fluente qu'elle serrait les puits et en arrêtait la descente et que dans le fond elle remontait plus vite qu'il n'était possible de l'enlever. Il fallut abandonner les puits et les remblayer.

Ces nouvelles difficultés montrèrent, comme l'avait déjà indiqué la galerie d'essai, qu'il était absolument nécessaire de renoncer aux procédés ordinaires. Sur le conseil du président Sir Henry Tiler, on décida de faire une fouille à l'emplacement des têtes du souterrain et d'appliquer la méthode du bouclier avec emploi d'un revêtement en fonte.

Mais les entrepreneurs, mis en défiance par l'échec du souterrain de Détroit et de la galerie d'essai à la rivière Saint-Clair, trouvèrent qu'il y avait trop de risques et aucun ne voulut traiter l'affaire. Pour en trouver un, il aurait fallu en tout cas lui offrir une grosse somme pour le couvrir des aléas de l'entreprise. La Compagnie dut prendre le parti d'exécuter le travail en régie.

Elle fit ouvrir, à chaque extrémité, au point fixé pour l'emplacement de l'entrée du souterrain, une fouille dont les parois furent dressées en talus. Ce travail fut attaqué en janvier 1889. Du côté américain, la fouille de 52 pieds (15,84 m.) de profondeur était terminée et le souterrain pouvait être attaqué le 11 juillet 1889. Du côté du Canada, la profondeur était de 60 pieds (18,29 m.). La fouille était presque achevée quand sur le flanc ouest, l'argile se mit à couler. Cet incident retarda le travail, et le souterrain ne put être ouvert que le 24 septembre.

Le bouclier. — M. Hobson n'avait pour tous renseignements que des dessins du bouclier de Brunel et des boucliers de Beach. Il ne connaissait pas, ou ne voulut pas s'inspirer des boucliers de Greathead au souterrain de la Tour et au City and South London, qui n'auraient pu convenir avec un terrain aussi fluide. Il s'inspira des essais de Beach, en les appropriant aux dimensions beaucoup plus fortes de l'ouvrage à construire.

Le bouclier (fig. 91 à 96) est formé d'un anneau cylindrique de

15 pieds 3 pouces (4,65 m.) de longueur et de 21 pieds 6 pouces (6,55 m.) de diamètre extérieur en tôle d'acier de 1 pouce (0,0254) d'épaisseur.

L'enveloppe était formée de quatre anneaux placés les uns au

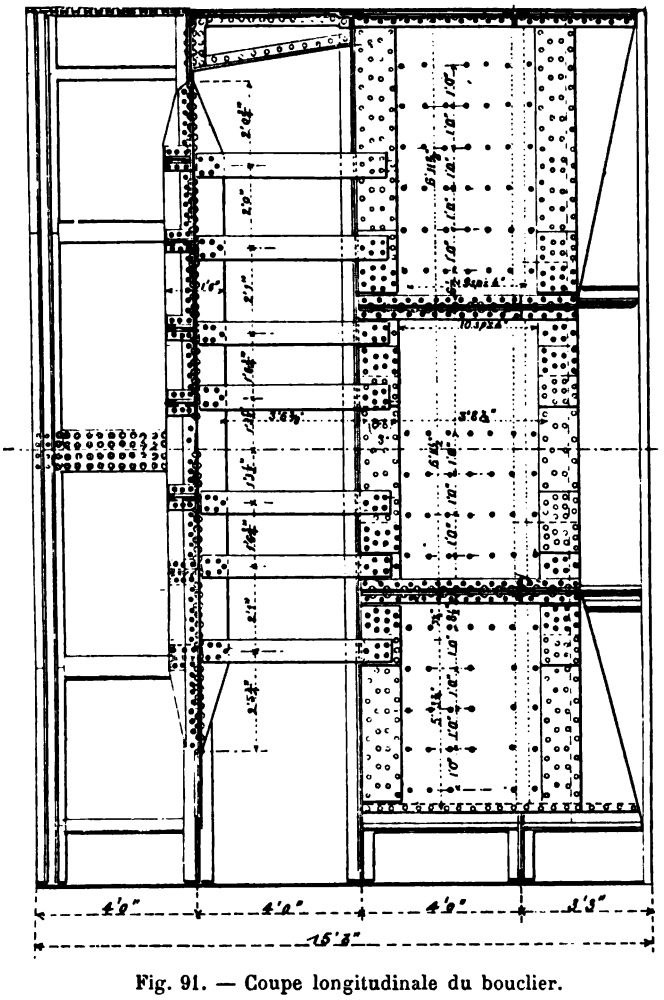


Fig. 91. — Coupe longitudinale du bouclier.

bout des autres ; les trois premiers avaient 4 pieds (1,22 m.) de longueur et le quatrième, placé à l'avant, 3 pieds 3 pouces (0,99 m.) seulement. Chacun de ces anneaux était formé de douze segments de 5 pieds 7 pouces $\frac{35}{64}$ de longueur (1,71 m.). Les joints transversaux

des anneaux et les joints longitudinaux des plaques sont tous à francs bords ; pour réunir les plaques entre elles, on employa des cornières placées à l'intérieur, rivées ensemble et aux plaques du bouclier. Cette disposition était très rationnelle puisque le bouclier

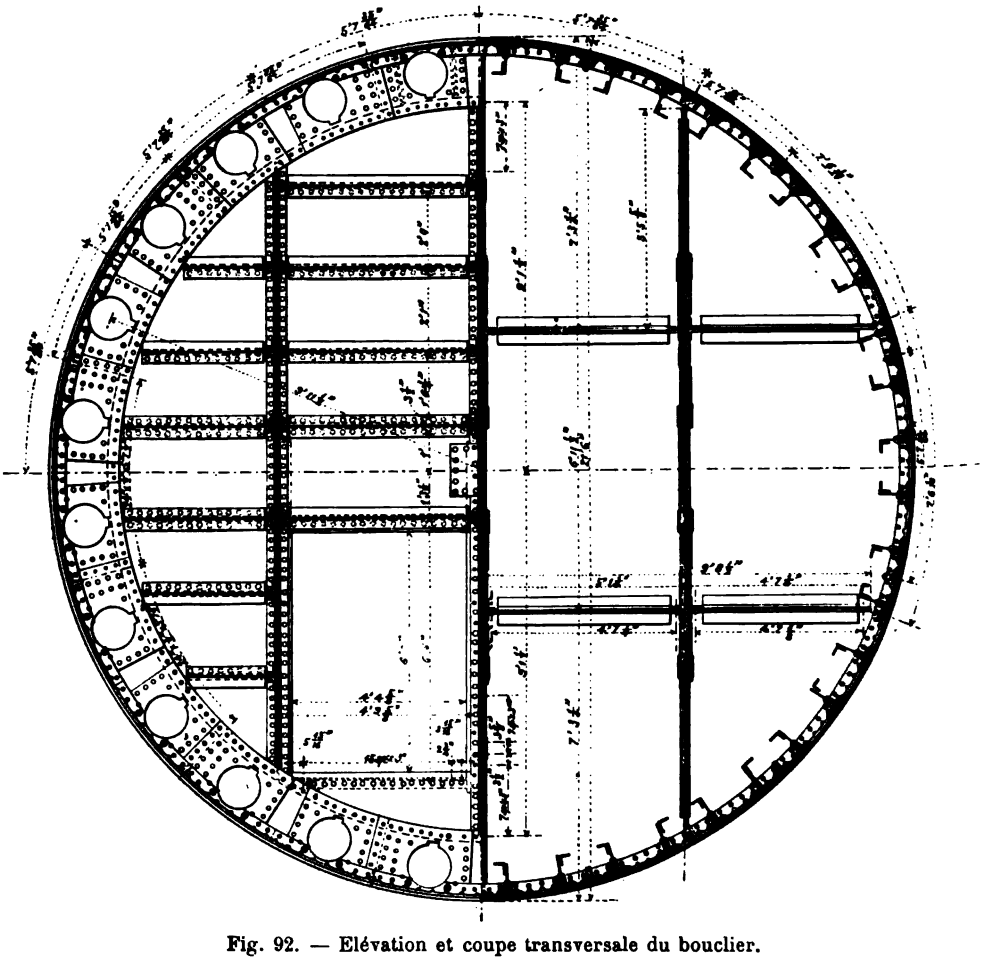


Fig. 92. — Elévation et coupe transversale du bouclier.

n'avait à résister qu'à des efforts de compression. Dans l'anneau d'arrière, la nécessité de ménager la place des vérins hydrauliques et d'éviter des saillies qui auraient entravé le montage du revêtement métallique, obligea à renoncer à l'emploi des cornières dans les joints longitudinaux ; elles furent remplacées par des couvre-

joints à l'extérieur et à l'intérieur ; les premiers avaient une épaisseur de 5/8 de pouce (0,016 m.) et une longueur de 4 pieds (1,22 m.) égale à celle de l'anneau ; les couvre-joints intérieurs avaient un 1/2 pouce (0,013 m.) d'épaisseur et leur longueur était seulement de 2 pieds 11 pouces 1/4 (0,89 m.) de longueur ; ils

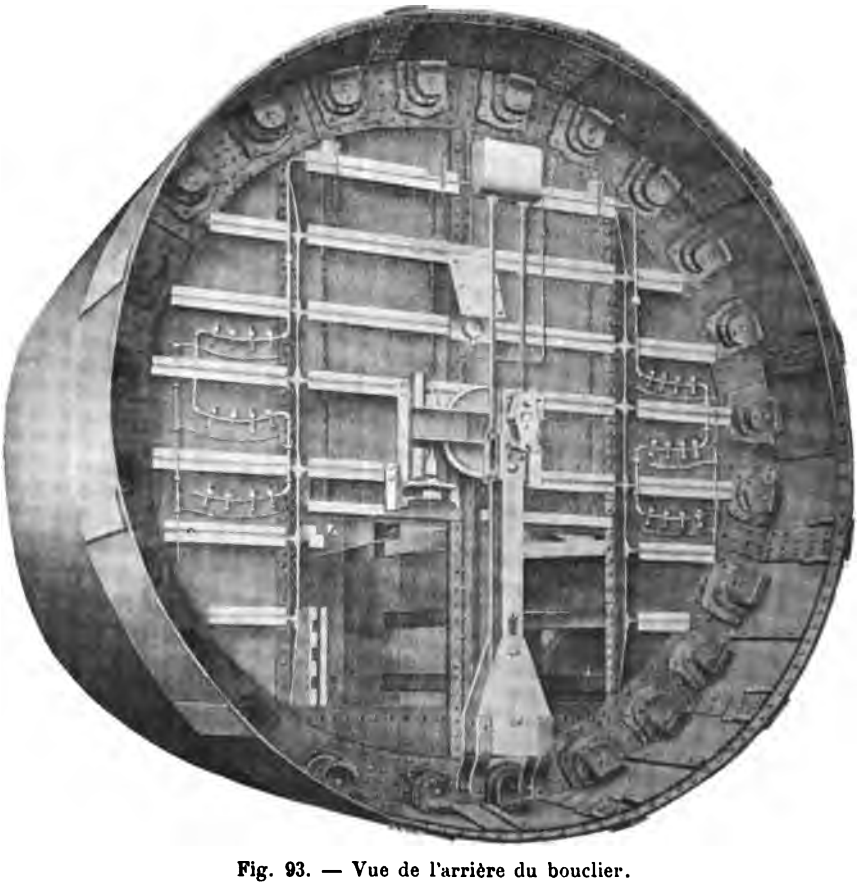


Fig. 93. — Vue de l'arrière du bouclier.

avaient tous 1 pied (0,305 m.) de largeur. Ces couvre-joints formaient seuls saillie à l'extérieur de l'enveloppe et tous les rivets étaient fraisés pour diminuer le frottement.

L'arête-avant du cylindre était chanfreinée sous un angle de 20° pour former couteau. A l'arête arrière, dans la partie laissée libre au bout des couvre-joints intérieurs (fig. 94), étaient rivées deux cornières de 3 pouces × 1 pouce 1/4 (76,2 mm. × 31,75 mm.),

laissant entre elles un espace annulaire de 2 pouces 1/2 (63,5 mm.), dans lequel fut introduit sur toute la circonférence un anneau en caoutchouc de 2 pouces carrés (50,8 mm. × 50,8 mm.), maintenu par des vis. M. Hobson croyait obtenir ainsi un joint étanche entre les anneaux du revêtement et l'enveloppe du bouclier et éviter toute infiltration d'eau et de boue liquide; l'élasticité du caoutchouc permettait aussi d'espérer une diminution des frottements dus aux inégalités de fonte et aux petites variations de direction du bouclier. Mais le frottement fut tel que, malgré un serrage énergique des vis, le caoutchouc

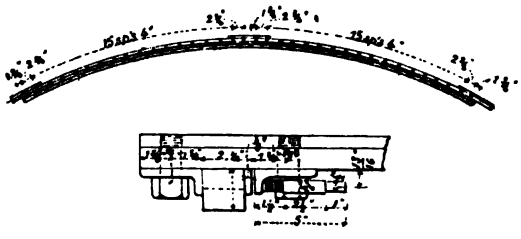


Fig. 94. — Détails de l'enveloppe du bouclier et de la rondelle en caoutchouc.

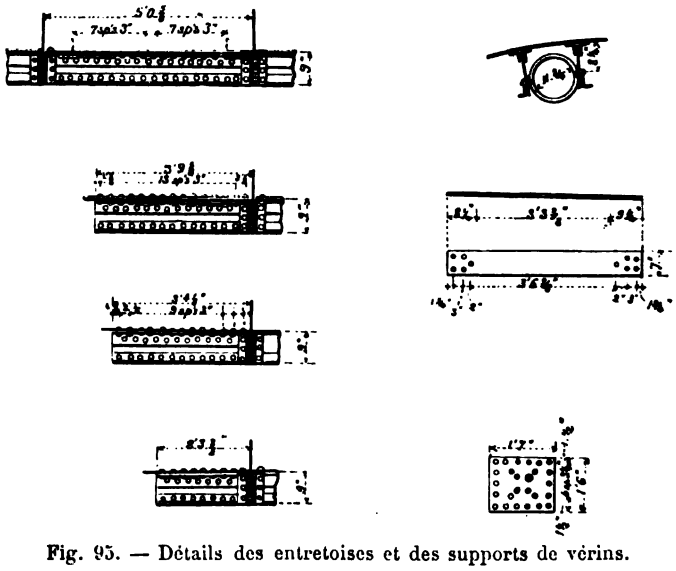


Fig. 95. — Détails des entretoises et des supports de vérins.

était arraché de la rainure. Il fallut le remplacer par un anneau en acier de même dimension, qui, dit-on, aurait donné d'excellents résultats.

Le bouclier comportait une première cloison étanche à 4 pieds

(1,22 m.) de son extrémité arrière, c'est-à-dire au joint du premier anneau. Cette cloison en tôle d'acier de un 1/2 pouce (12,7 mm.) d'épaisseur était rivée aux cornières de ce joint. Elle était raidie par sept poutres horizontales et trois poutres verticales formant une saillie de 9 pouces (0,228 m.). A la partie inférieure de cette paroi se trouvaient deux ouvertures rectangulaires de 6 pieds (1,83 m.) de hauteur sur 4 pieds 6 pouces (1,37 m.) de largeur, pour le passage des hommes et des déblais. Ces ouvertures pouvaient être

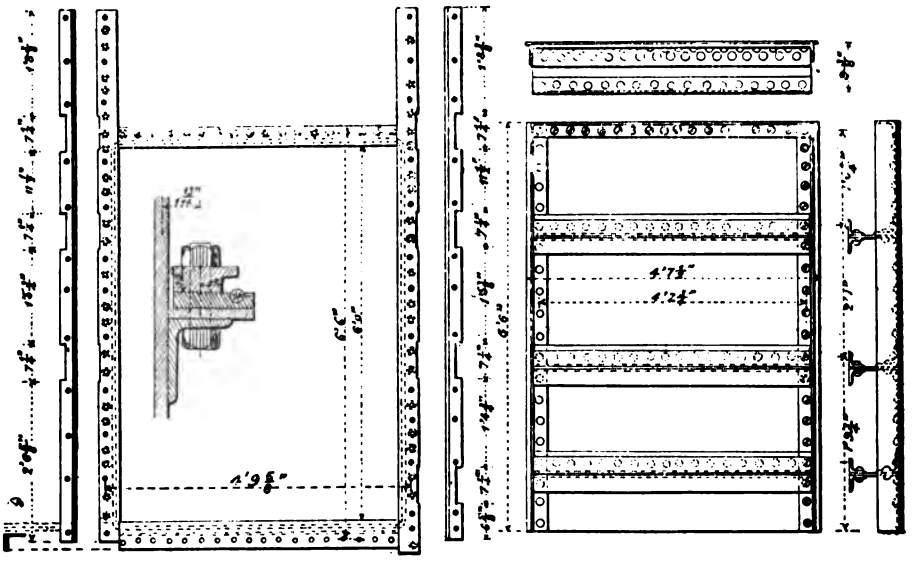


Fig. 96. — Détails des portes du bouclier.

fermées par des portes à coulisse suspendues par une chaîne, en cas d'irruption d'eau ou d'argile fluente. Ces portes devaient tomber par leur propre poids, mais si elles avaient été arrêtées dans leur chute par l'afflux d'argile, comme elles se trouvaient en dedans et offraient au dehors une surface lisse ne laissant pas de prise, il eût été très difficile de les enfoncer de force jusqu'en bas. La prudence eût commandé d'installer un vérin ou une vis permettant de les pousser à fond, ou tout au moins de ménager la prise d'une pince. Les précautions les plus minutieuses furent d'ailleurs prises. Avant d'avancer le bouclier, des sondages étaient exécutés à 8 pieds (2,44 m.) en avant de la fouille. Si l'un d'eux avait révélé la

présence d'une couche de sable mouvant ou d'une venue d'eau il serait resté assez de temps pour faire retirer les ouvriers et fermer les portes. La position de ces portes dans le bas de la cloison est peut-être critiquable ; en cas d'irruption subite, elles auraient été immédiatement bloquées et les ouvriers, qui travaillaient en haut du bouclier, enfermés sans issue possible. Heureusement il ne fut jamais nécessaire de les fermer.

La figure 96 donne les détails de ces portes qui avaient été très étudiées. Tout autour du cadre dans lequel elles devaient glisser, il y avait une garniture en caoutchouc, contre lequel elles se seraient appuyées en formant un joint étanche.

La cloison était percée sur son pourtour de vingt-quatre trous de 13 pouces 1/2 (0,343 m.) de diamètre pour les presses hydrauliques. Afin de compenser l'affaiblissement de la tôle qui en résultait, il existait une bande circulaire de renforcement de un 1/2 pouce (0,013 m.) d'épaisseur et 16 pouces (0,406 m.) de largeur. Chacune de ces presses (fig. 95) était portée par deux goussets rivés à la cloison et à l'enveloppe cylindrique. Ces goussets servaient à transmettre la poussée des presses à l'enveloppe extérieure et par suite à vaincre le frottement des terres qui s'opposait à son avancement ; un anneau boulonné (fig. 95) reliait dans ce but les cylindres des presses aux goussets. L'extrémité des cylindres des presses était en outre munie d'une saillie qui s'appuyait contre la cloison étanche. Une pièce annulaire, boulonnée sur cette saillie, par quatre boulons de 3/4 pouce (0,019 m.) de diamètre, de l'autre côté de la cloison, recevait la pression quand l'admission se faisait en sens inverse, pour ramener les tiges et laisser la place libre pour le montage d'un anneau.

En avant de la cloison étanche, le bouclier était renforcé contre les déformations dues à la poussée des terres par trois divisions verticales et deux horizontales. Ces dernières servaient en même temps de planchers pour le travail des mineurs (fig. 92). Ces divisions ne commençaient qu'au troisième anneau, c'est-à-dire à 4 pieds (1,22 m.) de la cloison étanche ; l'espace libre ainsi réservé était utilisé par les ouvriers des plates-formes pour y jeter les déblais devant les portes de la cloison étanche. Les divisions horizontales s'étendaient jusqu'à l'aplomb du cou-

teau, tandis que les divisions verticales s'arrêtaient dans la partie centrale un peu en arrière et s'étendaient jusqu'au couteau en forme de gousset. La cloison étanche était reliée aux divisions verticales par des plaques en tôle de 4 pieds 9 pouces (1,45 m.) de longueur, 7 pouces (0,178 m.) de largeur et 1/2 pouce (0,013 m.) d'épaisseur. Ces tirants avaient pour but de donner à la cloison une résistance suffisante contre la poussée des terres ou de l'eau qui pouvaient pénétrer dans le bouclier. Ils rendirent des services, quand le bouclier atteignit les cloisons provisoires placées en bout des galeries d'essai.

Quelque fort que paraisse ce bouclier, il était encore trop faible et il fallut le renforcer par des étais en bois placés en diagonale dans chacune des 12 cellules formées par les divisions; certaines parties étaient littéralement encombrées de bois. Mais l'argile était si molle qu'elle coulait à travers les obstacles, sans qu'il en résultât de gêne.

Les deux boucliers furent construits par la « Hamilton tool and bridge manufacturing C° Ontario ». Leur poids considérable de 160 000 livres (72 575 kg.) obligea à exécuter sur place au bord de la fouille et au niveau du terrain naturel l'assemblage des diverses pièces préparées à l'usine et amenées par chemin de fer. Un berceau en charpente destiné à recevoir le bouclier fut construit dans le fond de la fouille et un plan incliné, formé de 4 cours de longuerines, de 1 pied carré (0,305 m.) espacés entre eux de 4 pieds (1,22 m.) fut installé sur le talus. La descente se fit au moyen de 6 câbles fixés à un bout, enroulés autour du bouclier et amarrés de l'autre bout à des pieux placés en haut du talus. La position du bouclier avait été calculée avec soin en haut du talus, afin qu'après avoir roulé sur le plan incliné il arriva sur son berceau exactement dans la position voulue pour le travail. Avec un homme à chaque câble, mollissant au signal, la descente de cette énorme masse se fit doucement en 80 minutes.

Travail à l'air comprimé. — Depuis l'entrée du souterrain jusqu'à la rivière il y avait 1716 pieds (523,03 m.) sur la rive américaine et 1 994 pieds (607,76 m.) sur la rive du Canada. A partir de ce point on construisit derrière le bouclier des massifs de

briques et ciment de 8 pieds (2,44 m.) d'épaisseur dans lesquels on plaça deux sas à air de 17 pieds (5,18 m.) de longueur et 6 pieds (1,83 m.) de diamètre. Il y avait en outre sur le côté un petit sas de 25 pieds (7,62 m.) de longueur et 10 pouces (0,25 m.) de diamètre pour les tuyaux de la conduite d'air trop longs pour passer par les autres sas.

L'air comprimé était fourni à chaque extrémité du souterrain par deux compresseurs d'Ingersoll de 20 pouces (0,508 m.) de diamètre et 24 pouces (0,61 m.) de course. Un tuyau de 6 pouces (0,152 m.) conduisait l'air jusqu'à l'avancement. On avait mis deux compresseurs à chaque extrémité afin de pouvoir éviter les arrêts; mais en pratique on dut utiliser toute l'installation, sans aucun arrêt, même les dimanches pendant six mois.

Au commencement l'air comprimé fut maintenu à la pression de 10 livres par pouce carré (0,71 kg.); mais en avançant dans les mauvais terrains sous la rivière, il fallut élever la pression à 28 livres (1,95 kg.). Chaque ouvrier était soumis à un examen médical avant d'entrer dans la chambre à air; il y eut cependant de nombreux cas de maladie et trois décès. Au début la vidange du sas se faisait par un robinet de 4 pouces (0,102 m.); mais on s'aperçut que la chute de pression se faisait trop vite, même avec les faibles pressions et on le remplaça par un autre de 1 pouce 1/2 (0,038 m.); avec ce robinet, l'éclusée pour une pression de 15 livres (1,05 kg.) se faisait en deux minutes. On y trouvait un avantage pour le passage des wagons de déblais, toujours en retard; mais pour les hommes la durée de l'éclusage était trop courte et on aurait évité bien des cas de maladie en la portant à 5 minutes.

La perte d'air était généralement faible et la plus grande consommation était celle nécessitée par le passage dans les écluses. Cependant en traversant le gravier, l'air s'échappait en abondance et venait causer de forts bouillonnements à la surface de l'eau dans la rivière. Il est probable qu'il y aurait eu avantage à employer l'air comprimé sur toute la longueur. Le terrain traversé sur les rives était très mauvais; l'argile était si molle qu'elle s'éboulait en grande quantité sur le sommet et sur les côtés du bouclier; le cube extrait a souvent dépassé de 50 p. 100

le vide de la fouille. Pendant le travail à l'air comprimé le terrain s'est beaucoup mieux tenu, et on enlevait un cube de terre à peine plus fort que le vide du souterrain. Il est vrai qu'à l'air comprimé les ouvriers, au nombre de 50 à chaque attaque, touchaient 1 dollar (5 fr.) de plus par jour, et qu'il eût fallu mettre les machines en marche. Néanmoins il est probable que les avantages du travail à l'air comprimé auraient compensé ce surcroît de dépense.

Tracé de l'axe. — Il était de la plus grande importance de suivre exactement la ligne d'axe ; car une erreur n'aurait pas seulement causé beaucoup de frais ; elle pouvait rendre inutiles toutes les dépenses et faire manquer l'opération.

Un théodolite fut placé en station à chaque tête, tout près du talus, sur le bord de la fouille. Pour éviter les mouvements du sol un pilier en briques de 3 pieds (0,91 m.) de côté fut descendu à 12 pieds (3,66 m.) de profondeur, et couronné avec une pierre de taille de 2 pieds (0,61 m.) d'épaisseur. Les théodolites étaient installés à poste fixe et couverts d'un abri. C'étaient d'ailleurs d'excellents instruments construits par Stakpole de New-York et Troughton and Simms de Londres. Ils avaient des objectifs de 2 pouces 1/2 (0,053 m.) et pouvaient tourner pour corriger l'erreur d'excentricité de l'axe horizontal.

Après avoir acheté et démoli une maison qui gênait la vue sur la rive américaine, les instruments furent réglés de manière que leurs axes de visée fussent exactement dans un même plan vertical d'une rive à l'autre à une distance de 1819,40 m. Cet axe fut ensuite reporté dans la fouille en plaçant, à l'entrée du souterrain un théodolite ordinaire de Stakpole exactement dans la ligne visée du grand. En faisant tourner ce dernier autour de son axe horizontal, de manière à viser l'intérieur du souterrain, la ligne d'axe pouvait être exactement déterminée.

Lorsque la cloison étanche fut posée, il fallut adopter une disposition spéciale. On intercala dans la maçonnerie de briques un tuyau en fer de 1 pied (0,305 m.) de diamètre et 25 pieds (7,62 m.) de longueur; ce tube était muni de robinets pour former sas à air; à chaque extrémité, la fermeture montée sur charnière se

composait d'un fort verre avec obturateur métallique de protection ; enfin près de chaque bout se trouvait un réticule formé d'une croisée de fils métalliques très fins, monté sur un anneau muni de vis horizontale et verticale qui permettaient de l'amener avec la plus grande précision, dans la ligne de visée du théodolite. L'opérateur enlevait l'obturateur du côté de l'air libre, et plaçait à l'intérieur une lampe pour éclairer les réticules, qu'il réglait de manière que leurs fils verticaux fussent bien dans la ligne de visée du théodolite ; il avait soin pendant cette opération d'ouvrir la plaque de verre, du côté de l'instrument de manière à viser les fils nus. L'opérateur portait alors l'instrument à l'intérieur et faisait l'opération inverse ; quand le théodolite était bien en ligne avec les fils, il n'y avait plus qu'à le faire tourner autour de son axe horizontal pour donner l'alignement.

Le nivellement se faisait par les procédés ordinaires. Pour traverser la cloison les fils horizontaux des réticules étaient utilisés de la même façon que les fils verticaux pour l'alignement.

Ces opérations assez rapides étaient répétées tous les jours. L'agent chargé de ce travail vérifiait la position du centre du bouclier et s'assurait que sa cloison étanche était bien perpendiculaire à l'axe. Il n'y a jamais eu de déviation de plus de (0,05 m.) 2 pouces. Quand les deux boucliers ne furent plus qu'à 100 pieds (30,58 m.) de distance une petite galerie boisée de 6 pieds (1,83 m.) fut creusée pour vérifier les mesures. Les boucliers arrivèrent en face l'un de l'autre avec un écart de 1/4 de pouce (0,006 m.) en plan et un écart inappréciable de niveau.

Ce résultat fait le plus grand honneur aux ingénieurs chargés de cette opération, MM. T. E. Hillmann et Blaiklock.

Revêtement en fonte. — Le revêtement en fonte (fig. 97 et 98) avait 21 pieds (6,40 m.) de diamètre extérieur et 2 pouces (0,05 m.) d'épaisseur. Les anneaux avaient 5 pieds moins 1/16 de pouce (1,52 m.) de longueur développée sur la circonférence et 18 pouces 1/4 (0,46 m.) de largeur suivant l'axe et 2 pouces (0,0508 m.) d'épaisseur. Les nervures transversales avaient 2 pouces 3/8 (0,0662 m.) d'épaisseur et les nervures longitudinales 2 pouces 3/4 (0,0688 m.) à la base et 1 pouce 5/8 (0,0413 m.) à l'extrémité. Elles avaient toutes

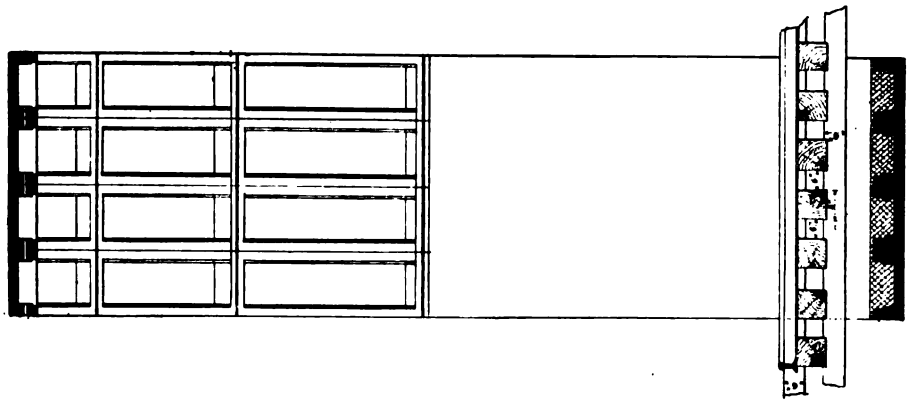


Fig. 98. — Coupe longitudinale.

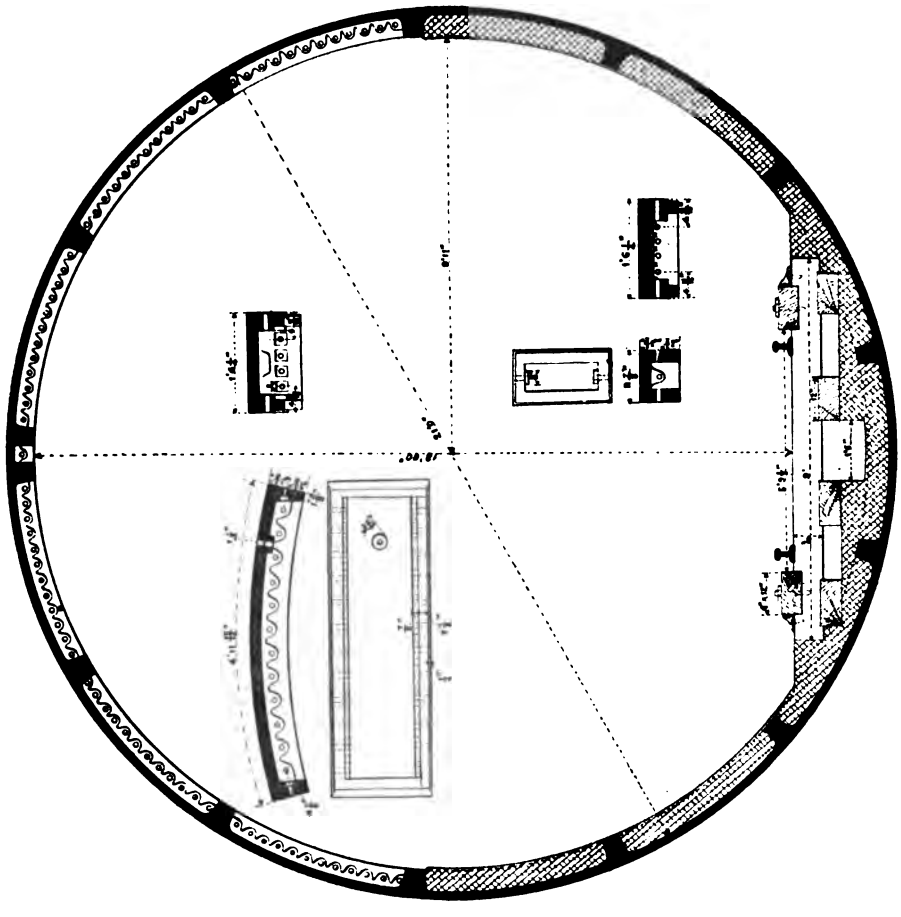


Fig. 97. — Coupe transversale.
Revêtement en fonte.

7 pouces (0,18 m.) de profondeur, ce qui réduisait le diamètre libre intérieur à 19 pieds 10 pouces (6,04 m.) Chaque nervure transversale comportait 12 trous de 1 pouce (0,025 m.) espacés de 4 pouces 1/2 (0,113 m.) d'axe en axe, entourés d'un renforcement de 7/8 pouce (0,026 m.) de hauteur et 3 pouces (0,076 m.) de diamètre venu de fonte avec le segment, afin de compenser l'affaiblissement. Les nervures longitudinales étaient percées de quatre trous de boulons espacés de 3 pouces (0,076 m.). Au centre du segment, un trou de 1 pouce 1/2 (0,038 m.) de diamètre renforcé par une saillie circulaire de 3 pouces 1/4 (0,082 m.) de diamètre avait été ménagé pour l'injection de mortier derrière les segments. Cette injection

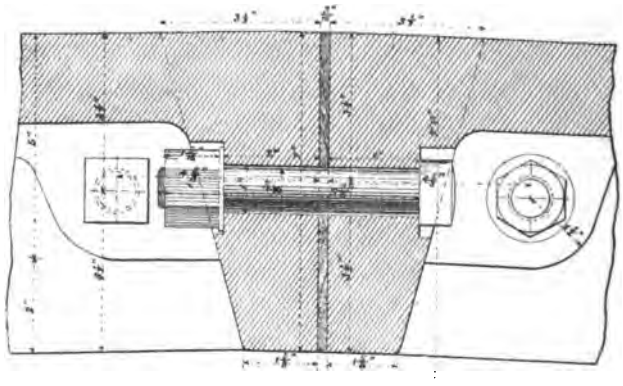


Fig. 99. — Joint longitudinal.

se faisait avec du ciment de Portland liquide, coulé au moyen d'un entonnoir. Il n'était possible de faire ce coulis qu'à la partie inférieure. Dans la partie haute, les vides étaient comblés par le tassement de l'argile. Il y avait 13 de ces segments et une clef de 9 pouces 7/8 (0,251 m.) de développement, suivant la circonférence extérieure. Les joints longitudinaux nécessitaient l'emploi de 56 boulons de 7/8 de pouce (0,0222 m.) de diamètre et 5 pouces 7/8 (0,149 m.) de longueur. Dans les joints transversaux entre les anneaux, il entrait 157 boulons de même diamètre, mais de 8 pouces (0,203 m.) de longueur. Tous ces boulons étaient en acier doux avec tête carrée et écrou hexagonal. Entre les écrous et les nervures était intercalée une rondelle de fer de 1/8 pouce (0,003 m.) d'épaisseur et 1 pouce 7/8 (0,047 m.) de diamètre.

La surface des joints longitudinaux (fig. 99) avait été soigneusement rabotée ; une fourrure en chêne blanc qui absorbait l'humidité et assurait l'étanchéité du joint était placée entre chaque anneau. Il est toutefois à craindre que ces fourrures ne pourrissent. Les joints transversaux (fig. 100) entre anneaux n'étaient pas rabotés et on se contentait d'intercaler une toile grossière enduite de goudron. Les faces en contact étaient entaillées du côté intérieur, de manière à former une rainure de 2 pouces (0,05 m.) de profondeur avec une largeur d'un 1/2 pouce (0,013 m.), afin de pouvoir couler du plomb, partout où il se produirait des infiltrations d'eau. Il a été nécessaire de recourir à ce procédé sur un grand nombre de points.

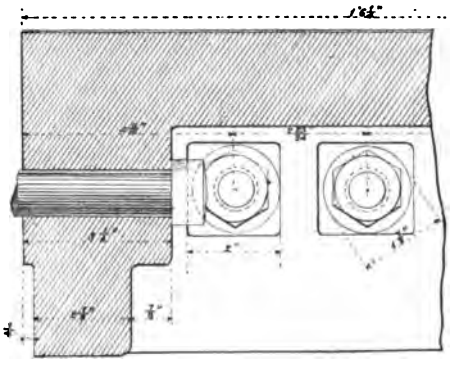
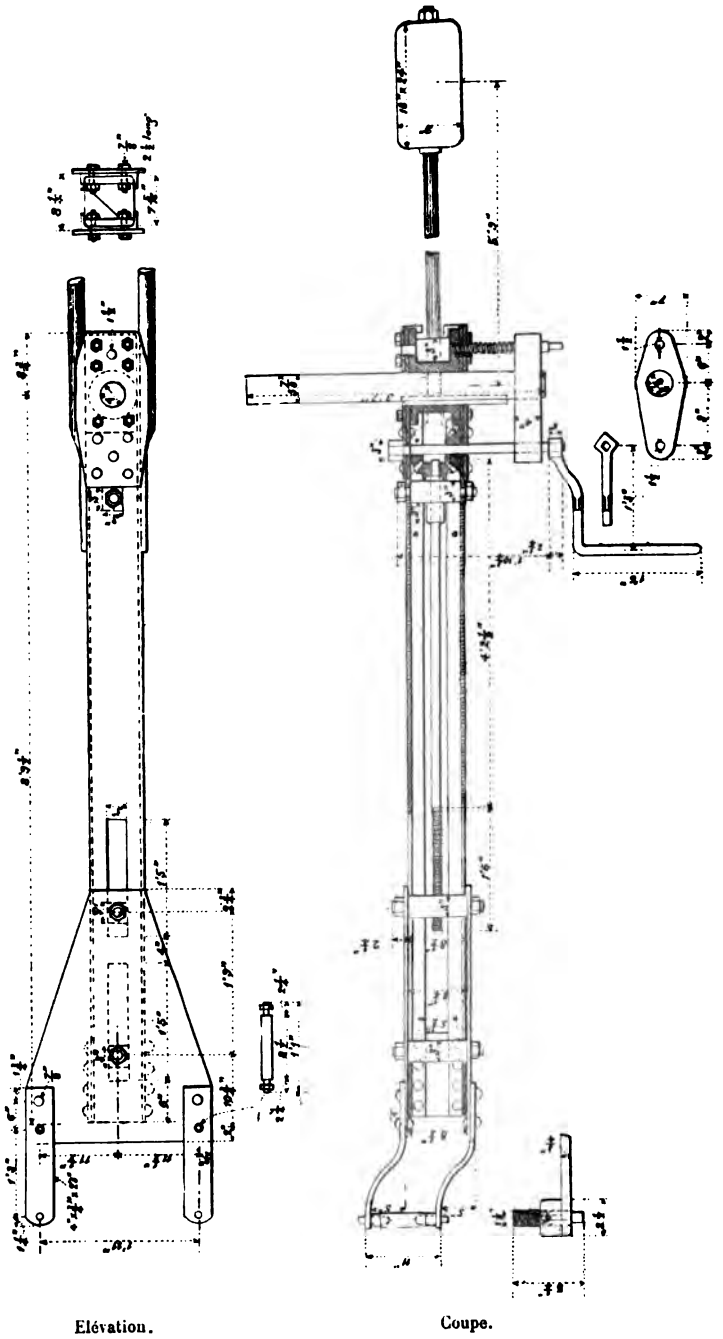


Fig. 100. — Joint transversal.

Le tiers environ de la fonte a été fabriquée aux ateliers d'Hamilton de la compagnie du Grand Trunk Railway, avec un mélange de 80 p. 100 de vieilles roues de wagons et 20 p. 100 de fonte écossaise. Le reste a été fondu aux usines de Détroit. Avant d'être reçus, les segments étaient soigneusement calibrés et pesés ; on n'admettait qu'une tolérance de 1/32 pouce (0,0008 m.) dans les dimensions et de 5 p. 100 sur les poids. Le poids par pied était de 9 333 livres (13 900 kg. par m. ct.). Le poids total de la fonte employée s'est élevé à 5 600 000 livres (25 400 t.).

Les joints des segments étaient rabotés dans un atelier installé sur place. Grâce à un outillage ingénieux, on en rabotait 9 à la fois, et de 90 à 99 par jour. Pour donner à la garniture en bois une épaisseur uniforme, ce rabotage ne se faisait pas suivant un plan diamétral, mais suivant un plan tangent à un cercle de 3/16 pouce (0,005 m.). En réalité, il s'agissait d'une correction insignifiante qui n'atteignait pas dans l'épaisseur du joint 1 p. 100 de pouce.

Les segments étaient ensuite chauffés au feu de bois à une tem-



Elévation. Coupe.

Fig. 101. — Grue de montage des anneaux.

pérature de 400° Farenheit (157° centigrades) et plongés dans un bain de goudron. Les planchettes de joints étaient trempées dans le même bain.

Grue de montage des anneaux. — Un appareil de cette nature avait été prévu par Greathead pour le souterrain de South Woolwich; mais celui de la rivière Saint-Clair a été construit sur les plans de M. T. C. Teper, ingénieur en chef de la Hamilton tool and bridge C°.

Cette grue (fig. 100 et 101) était montée sur un axe, fixé au centre du bouclier, au moyen de tôles et cornières boulonnées sur les poutres qui raidissaient la cloison étanche. Une manivelle et des roues coniques d'engrenage permettaient d'éloigner ou de rapprocher de la paroi cylindrique le bras servant à lever les segments et à les mettre en place. Une autre vis permettait de faire glisser la grue sur l'axe pour l'éloigner ou la rapprocher de la paroi étanche. Enfin, un système d'engrenages avec vis sans fin (fig. 102), servait à faire tourner la grue autour de son axe. La manivelle servant à donner cette rotation était placée de l'autre côté de la paroi étanche, à l'intérieur du bouclier, pour ne pas gêner le mouvement. Un contrepoids en fonte équilibrait tout le système. La tête de la grue avait quatre bras, formant deux étaux pour saisir les plaques par les trous de boulons.

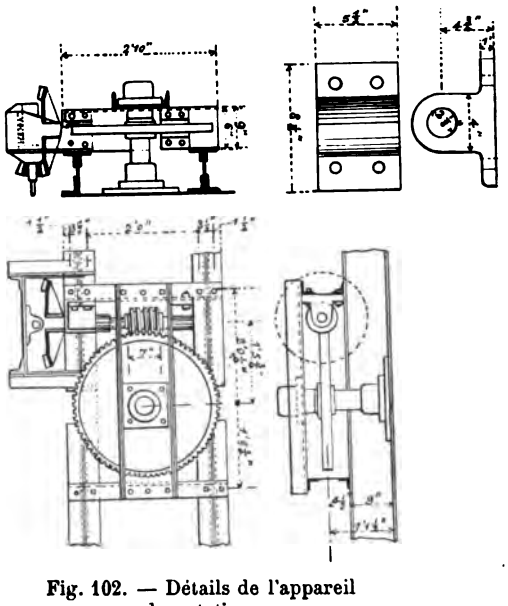


Fig. 102. — Détails de l'appareil de rotation.

Les trois mouvements de la grue permettaient de prendre un segment, de le lever et de le mettre en place. Le temps nécessaire, avec une équipe de quinze hommes, pour monter un anneau et le boulonner provisoirement était de quarante-cinq minutes ; le serrage des boulons se faisait ultérieurement avec des échafaudages volants.

Le montage se commençait par le bas, se poursuivait simultanément des deux côtés et finissait par la clef. La grue maintenait le segment pendant la pose des fourrures en bois et le boulonnage provisoire.

Coupe du souterrain. — Il a déjà été dit que l'on faisait derrière les anneaux en fonte dans la partie inférieure un coulis en ciment. Pendant la durée des travaux, une couche de 2 pieds (0,61 m.) d'argile était déposée dans le fond de la galerie pour porter la double voie d'un tramway à voie étroite, à traction par chevaux, pour le transport des déblais et des segments. Après l'achèvement, il était procédé à un nettoyage soigné et sur la moitié inférieure l'intervalle des nervures était garni de briques. Des petits massifs de maçonnerie de briques étaient ensuite montés pour recevoir les longuerines et les traverses de la voie permanente. Le tout était ensuite recouvert d'un enduit au mortier de ciment de 1 pouce (0,025 m.) d'épaisseur, qui couvrait même les nervures ; car il y avait lieu de craindre la corrosion du métal de l'enveloppe par la saumure qui coule des wagons réfrigérants. La partie supérieure était simplement nettoyée et recevait une couche de goudron.

Les dispositions des longuerines, des traverses et du plancher de protection sont clairement indiquées sur la figure 97. Toutes ces pièces de bois étaient en pin jaune créosoté, à raison de 16 livres par pied cube (260 kg. par mètre cube). Les rails étaient du type Vignole et pesaient 100 livres par yard (49,60 kg. par mètre courant).

Outillage hydraulique. — Chacun des verins du bouclier comprenait deux pistons, l'un de 8 pouces (0,203 m.) de diamètre pour l'avancement et l'autre de 2 pouces 3/8 (0,0603 m.) pour ramener le grand en arrière pendant le montage du revêtement. A la pression de 2 000 livres par pouce carré (140 kg. par centimètre carré), ils pouvaient, abstraction faite des frottements, développer respectivement des efforts de 45,4 t. et 4 t.

Les cylindres étaient en acier fondu, afin de diminuer l'épaisseur du métal, ainsi que la tête de la tige ; les pistons plongeurs en fonte. Le gros piston se terminait par une tête (fig. 103) dont la

forme était tracée de manière à porter uniquement sur la partie

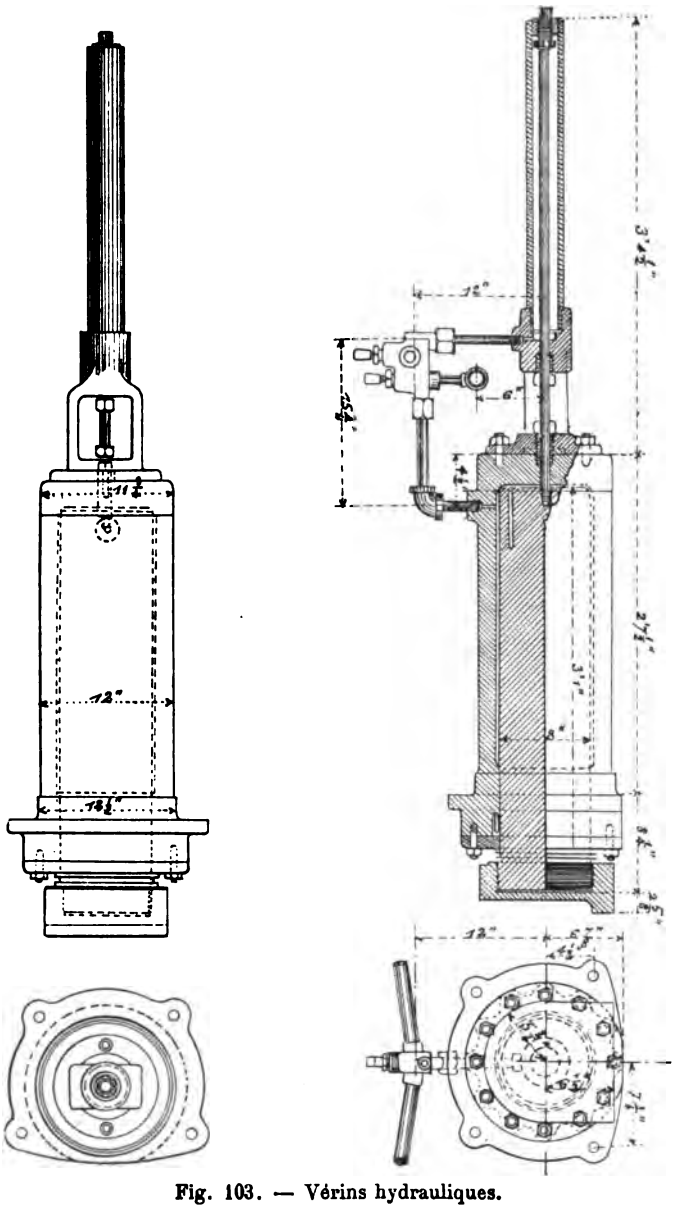


Fig. 103. — Vérins hydrauliques.

cylindrique du revêtement, dans la crainte de briser les nervures. Cette tête était vissée et pouvait être enlevée pour refaire la garni-

ture du presse-étoupe dont le couvercle était fixé par des boulons en cuivre. La course des pistons était de 26 pouces (0,66 m.), mais afin d'éviter la rupture du petit piston, elle était limitée à 23 pouces (0,58 m.), et un trou ménagé faisait tomber automatiquement la pression, dès qu'il atteignait le cuir de garniture. Les robinets étaient réunis à portée de la main par groupes de quatre.

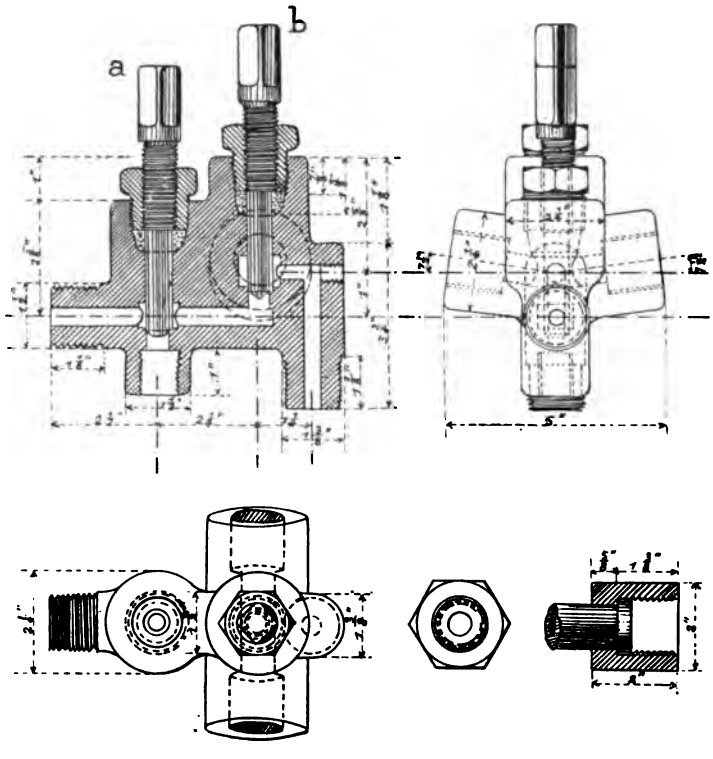


Fig. 104. — Robinets des vérins hydrauliques.

Le tuyau d'amenée de l'eau sous pression était placé au sommet, puis il se divisait en deux branches, qui contournaient l'enveloppe à droite et à gauche pour desservir les groupes de robinets. Dans ces groupes, chaque robinet portait un numéro apparent qui était reproduit sur le vérin correspondant.

Le robinet *b* (fig. 104) réglait l'admission au grand cylindre et le robinet *a* la décharge. Quant au petit cylindre, il était toujours en pression, de sorte que le recul du vérin se faisait automatique-

ment. Les tuyaux flexibles furent remplacés par la disposition de la figure 105 qui permettait de suivre l'avancement du bouclier. Deux demi-tuyaux étaient réunis entre eux et aux deux bouts fixes de la conduite par des joints à rotation. Ces joints comportaient un cuir embouti et des ouvertures pour assurer le graissage des parties frottantes. Ils ont, paraît-il, donné les meilleurs résultats.

Les pompes d'alimentation étaient installées près des têtes. Elles se composaient d'une machine à double action directe avec des cylindres à vapeur de 12 pouces (0,305 m.) de diamètre et des cylindres de compression de 1 pouce (0,025 m.).

Les tuyaux d'amenée avaient 1 pouce 1/4 (0,031), de diamètre et leur longueur atteignait du côté américain, au moment de la rencontre des boucliers, une longueur de 4 400 pieds (1 241,10 m.).

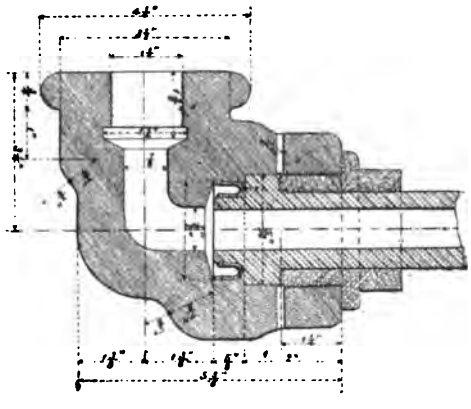


Fig. 105. — Joints à rotation.

Tous ces appareils étaient fournis par la maison Watson et Stillman, de New-York, qui avait déjà livré un outillage à peu près semblable pour le bouclier Beach.

Les vérins ont été multipliés et employés avec une forte pression pour moins fatiguer le bouclier. Il eût fallu en effet autrement augmenter le diamètre des vérins : leur axe eût par suite été éloigné de l'enveloppe cylindrique, qui seule offre une résistance sérieuse, et les efforts appliqués sur la cloison étanche auraient été augmentés. En pratique, la seule résistance à vaincre était le frottement contre l'argile. Il a fallu développer des efforts de 450 à 2 000 t. américaines de 2 000 livres (408 à 1 814 t. métriques). Comme la surface du bouclier en contact avec le terrain était de 1 030 pieds carrés (96 m²), la pression due au frottement a varié de 875 à 3 880 livres par pied carré (4,2 à 18 t. par mètre carré).

M. Hobson s'était réservé personnellement la surveillance de la

pression qui était limitée normalement à 1 089 t. correspondant à une alimentation à 140 kg. par centimètre carré. Cette surveillance était surtout nécessaire, quand, pour redresser le bouclier, une partie des vérins était seule en service. Une fausse manœuvre en disloquant le bouclier pouvait en effet tout compromettre.

Appareils divers. — Accessoires. — L'éclairage était assuré par deux dynamos Edison du côté de l'Amérique et Ball du côté du Canada ; les lampes à incandescence étaient en nombre suffisant pour la sécurité sur le parcours, mais le chantier était puissamment éclairé.

La ventilation se faisait dans les parties à l'air libre avec deux ventilateurs soufflants de Root débitant 10 000 pieds cubiques (282 m³) à la minute, et une canalisation en tôle galvanisée de 2 pieds (0,61 m.) prolongée jusqu'à l'écluse. Dans les parties où le travail se faisait à l'air comprimé, la conduite était prolongée jusqu'auprès du bouclier, pour renouveler l'air et diluer les gaz dont l'accumulation serait devenue dangereuse.

Il a été nécessaire de faire d'importantes installations pour éviter que les eaux des pluies d'orage n'envahissent le souterrain par les rampes d'accès. Pendant la construction, l'étanchéité du revêtement évitait les épuisements ; tant que le travail s'est fait sous les rives, il n'y a eu à enlever que l'eau provenant de l'échappement des vérins et de l'égouttage des déblais, et il n'y avait pas besoin de pompes. Sous la rivière, l'eau était refoulée à l'aide de la pression même, par un tuyau de 2 pouces (0,051 m.) traversant le mur de sas, dans une bâche, où elle était reprise au moyen de pompes Worthington, débitant 200 gallons (909 lit.) à la minute, et refoulée dans la rivière par un tuyau de 3 pouces (0,076 m.) installé dans un petit puits spécial. Depuis l'achèvement, la quantité d'eau recueillie au point bas n'excède pas 15 gallons par minute (un peu plus de 1 lit. à la seconde).

Le transport des déblais était effectué dans des petits wagons à 4 roues cubant un yard cube (0,76 m³) traînés par des chevaux ; dans la rampe, il y avait trois relais. A la tête du souterrain, les caisses étaient élevées par deux grues successivement pour franchir la hauteur du talus puis vidées dans des plates-

formes et enmenées aux décharges. Ces grues étaient actionnées, au moyen d'une transmission par câble, par des machines à vapeur de 50 chev.

La vapeur nécessaire pour la marche des compresseurs à air et à eau, l'éclairage, la ventilation, les appareils de levage, etc., était fournie par 3 chaudières de 70 chev. et 4 de 80 chev.

Marche du travail. — Le travail se continuait de jour et de nuit, sans aucune interruption. Les ouvriers travaillaient par équipes de 8 heures, au nombre de 75 à chaque attaque, dont 26 à la fouille et 15 au montage et au boulonnage du revêtement.

Lorsque l'argile paraissait ferme, la fouille était préparée sur 2 à 3 pieds (0,61 m. à 0,91 m.) en avant du couteau. Quand, au contraire, le terrain était mou, l'avancement du bouclier se faisait au fur et à mesure de l'exécution du déblai. Quand le terrain était tout à fait sans consistance, les ouvriers se retiraient derrière la cloison et le bouclier était poussé dans la masse, en laissant couler les terres par les ouvertures. Il ne fut nécessaire de recourir à cette mesure qu'en arrivant au bout des galeries de recherche ; le blindage du front d'attaque de ces galeries avait cédé, et il s'était formé à travers l'argile une cheminée qui s'était remplie de sable et de gravier sans consistance. Sur ce point, on perdit beaucoup d'air et il fallut élever la pression à 35 livres (2,5 kg.), quoiqu'on eût soin de glaiser la surface du gravier.

Il y avait toujours un homme occupé à sonder en avant du bouclier ; il faisait, avec une tarière de 6 pouces (0,15 m.) de diamètre, 5 à 6 trous répartis sur la surface d'attaque, et d'environ 10 pieds (3,05 m.) de profondeur. Ces sondages donnaient une grande sécurité, car ils pouvaient avertir de la présence de sables fluents ou de gaz inflammables. M. Hobson fit de nombreuses expériences pour trouver un moyen de révéler la présence de ces gaz ; en fait, il dut se contenter de la lampe Davy ; et quoique la couleur noire de certaines couches de gravier ait prouvé que ces gaz devaient être très abondants, ils étaient rapidement dilués et enlevés, grâce à l'énergique ventilation due à l'air comprimé.

Le bouclier a rencontré dans l'argile beaucoup de blocs de pierre, dont quelques-uns pesaient plusieurs tonnes. Avant l'emploi de

l'air comprimé, on les faisait sauter à la mine en avant du bouclier. A l'air comprimé, les mineurs faisaient, si le terrain le permettait, une fouille latérale pour y loger le bloc ; sinon ils le débitaient à la masse, avec des coins ou des ciseaux.

Fig. 106. Bêche de drainage.

Le déblai pesait 125 livres par pied cubique (2 045 kg. par m³). Cette argile avait la consistance du caoutchouc, et il avait fallu substituer aux pelles de longues bêches pour drainage (fig. 106), mais l'équipe de 26 hommes n'exécutait encore en huit heures la fouille que sur 2 pieds (0,61 m.). Un tonnelier qui avait été embauché, et qui ne pouvait arriver à se servir de la bêche, apporta un jour un racloir (fig. 107) composé d'une bande de fer en demi-cercle de 6 pouces (0,15 m.) de diamètre emmanchée avec deux poignées en bois. Il fut d'abord l'objet des railleries de ses camarades, mais on dut reconnaître que cet instrument facilitait le travail et on en munit tous les ouvriers. Cette modification, due au hasard, permit de doubler l'avancement.

Fig. 107. Racloir.

Pendant la marche, les boucliers tournèrent autour de leur axe. Le bouclier américain, parti en juillet 1889, tourna vers le Nord jusqu'en juillet 1890, époque à laquelle il avait décrit un angle de 20°. Il commença alors à tourner vers le Sud et le 30 août, à l'achèvement, il faisait un angle de 30° vers le Sud. Le bouclier canadien tourna constamment vers le Sud et, quand il rencontra l'autre, l'inclinaison était à peu près la même et les divisions horizontales se rencontrèrent bord à bord. C'est là un phénomène général avec les boucliers circulaires. On n'en a guère donné d'explication plausible, pas plus d'ailleurs que l'on a su y remédier.

Le profil ci-joint (fig. 108) donne l'avancement mensuel ; il a été en moyenne sur la rive américaine de 263 pieds (80,26 m.) et sur la rive du Canada de 219 pieds (66,75 m.). Le maximum a été atteint, du premier côté, en juillet 1890, où l'on a avancé de 382, 30 pieds, soit 12 pieds 33 par jour (116,52 m., ou 3,76 m. par jour). On est arrivé à placer en une journée 10 anneaux de revêtement, ce qui représente en vingt-quatre heures 15, 3 pieds (4,66 m.)

Cet avancement est résumé dans le tableau ci-après :

ANNÉE 1889	CÔTÉ du CANADA	CÔTÉ de L'AMÉRIQUE	ANNÉE 1890	CÔTÉ du CANADA	CÔTÉ de L'AMÉRIQUE
Juillet.	»	53,00	Janvier.	292.35	277,59
Août.	»	144,05	Février.	306,08	273,67
Septembre.	73P·30	153,70	Mars.	292,50	203,63
Octobre.	109,45	126,75	Avril.	281,34	182,20
Novembre.	187,50	225,50	Mai.	97,00	355,54
Décembre	217,40	266,91	Juin.	236,83	354,46
			Juillet.	201,30	382,30
			Août.	334,04	311,11

Quand les deux boucliers furent à une distance de 125 pieds (38,10 m.), on attaqua une petite galerie de jonction de 6 pieds (1,83 m.) de diamètre revêtue avec des blocs de sapin formant voussoirs de 2 pieds (0,61 m.) de longueur et 12 pouces carrés de section. Le 23 août, il n'y avait plus que 15 pieds (4,57 m.) à

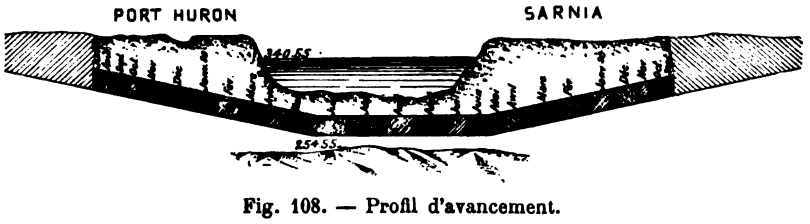


Fig. 108. — Profil d'avancement.

percer ; les ouvriers firent un trou et passèrent un paquet de tabac, ce fut la première marchandise qui traversa sous la rivière. Le 25 août, à midi, le percement se fit en présence de M. Hobson et des principaux représentants et agents de la Compagnie. Au même moment, à un signal donné, toutes les machines à vapeur de Sarnia sifflèrent en l'honneur de l'achèvement.

La fouille était complète et les couteaux des deux boucliers en

contact le 30 août. Par mesure de précaution, on se contenta de démonter les cloisons et on abandonna les enveloppes, à l'intérieur desquelles fut placé le revêtement métallique. La fermeture se fit par un anneau spécial. Il ne restait plus qu'à faire le nettoyage, le revêtement en maçonnerie, et les installations permanentes, ainsi que les rampes d'accès.

Dépenses. — La dépense totale de construction s'est élevée à environ 2 700 000 dollars (13 500 000 fr.) y compris la subvention du Gouvernement du Canada. Elle se répartirait comme suit :

Travaux préliminaires	250 000	dollars, soit	1 250 000 fr.
Machinerie et installations	250 000	—	1 250 000 —
Main-d'œuvre	900 000	—	4 500 000 —
Fonte du revêtement	800 000	—	4 000 000 —
Matériaux divers	100 000	—	500 000 —
Acquisition de terrain, impôt, etc.	110 000	—	550 000 —
Voie et matériel roulant	50 000	—	250 000 —
Tranchées d'accès	200 000	—	1 000 000 —
Etudes et surveillance	40 000	—	200 000 —
	2 700 000	—	13 500 000 —

L'ingénieur en chef, M. Hobson, avait pour collaborateurs deux ingénieurs assistants, M. T. E. Hillman et Blaiklock, un ingénieur chargé des machines, MM. J. T. Eams, et un ingénieur chargé de diriger le travail de fouille, M. Thos. Murphy.

Remarques. — On s'est beaucoup préoccupé à propos de ce travail des conditions d'équilibre du souterrain. Le volume déplacé, pour le diamètre de 21 pieds, est de 346 pieds cubiques par pied courant (32 m³ par mètre courant).

L'argile pesant 125 livres par pied cubique (2 045 kg. par m³), la poussée variait, suivant que l'on considérait l'argile comme fluide ou que l'on ne considérait que l'eau qu'elle contenait, entre [illegible] ou 13 250 livres et 346 × 62,5 ou 21 625 livres par pied [illegible] à 32 000 kg. par mètre courant). Le poids total [illegible] et de la voie permanente est de moins de 11 000 livres [illegible] kg. par mètre courant).

[illegible] à un fluide parfait le [illegible]rait sou-

levé. En réalité, il est soumis à une poussée de bas en haut due à cette différence de poids et à une pression de haut en bas due à la terre qui se trouve en dessus, dont le volume est assez difficile à délimiter. Lequel l'emportera?

Les Américains proposent, pour valeur de la pression de bas en haut, de prendre le minimum 32 000 kg. et d'y ajouter le 1/3 de la différence avec le maximum, 11147 kg., soit en tout 43 147 kg. de sous-pression, dont il y a à déduire toutefois le poids de l'ouvrage 16 370 kg. Il resterait 26 777 kg. pour la poussée de bas en haut par mètre courant. Quant à la charge, l'argile dans l'eau pèse 2 045 kg. moins son volume d'eau, soit 1 045 kg. Une couche de 1 m. sur toute la largeur de 6,40 m. de la galerie pèse donc 1 045 × 6,40 m. ou 6 688 kg. et, pour équilibrer la sous-pression, il faut une épaisseur de

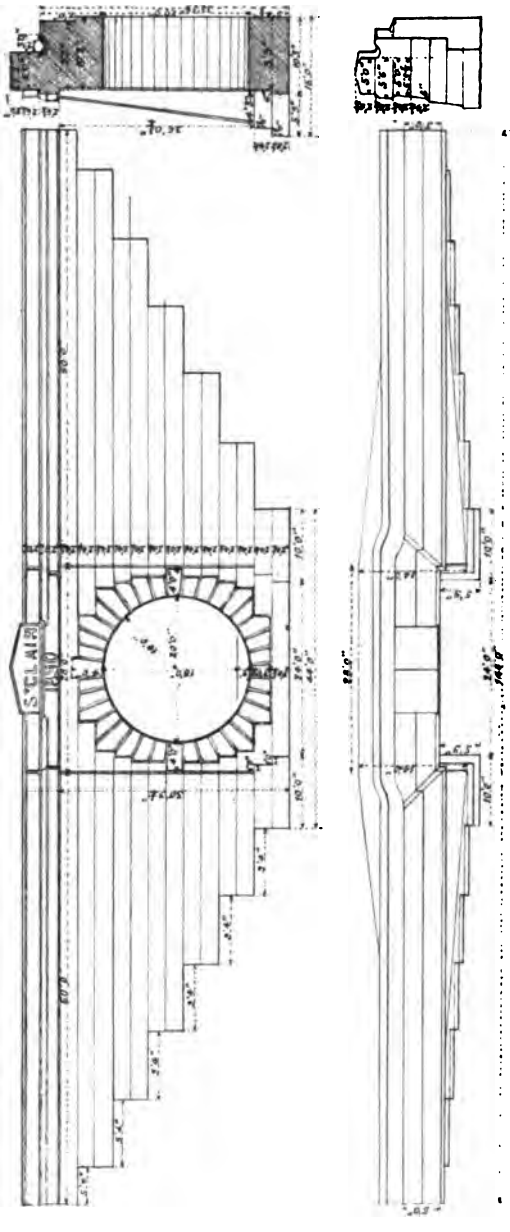


Fig. 109. — Tête du souterrain.

26 777 : 6 688, ou de 4,00 m. environ. Il faut tenir compte que la base n'est pas à l'extrados, mais environ 0,80 m. en dessous. L'épaisseur nécessaire se réduirait donc à 3,20 m.

A la rivière Saint-Clair, il y a quatre points où la couche d'argile est inférieure à ce chiffre ; mais elle est chargée d'une couche de sable, de gravier et de blocs qui font compensation. On doit tenir compte enfin de l'adhérence de l'argile et de la raideur de l'enveloppe, qui, pour être inconnues, n'en jouent pas moins un rôle pour empêcher le mouvement.

Ce qu'il y a de certain, c'est que l'enveloppe est soumise à des efforts. Le point faible est évidemment le joint. En ce qui concerne les joints transversaux, il y a 157 boulons de 7/8 pouce (0,022 m.) de diamètre, offrant une surface totale de résistance au cisaillement de 94 pouces 1/2 carrés, ce qui, à raison de 60 000 livres par pouce carré (42 kg. par mm²) donnerait une résistance totale de 5 670 000 livres ou 2 572 t., ce qui est considérable. Les joints longitudinaux, sous l'effet des pressions et des déformations qui peuvent en résulter, sont beaucoup moins forts et les nervures pourraient se briser.

CHAPITRE VI

DISTRIBUTION D'EAU DE LIVERPOOL

SOUTERRAIN SOUS LA MERSEY

(1890-1892)

Exposé. — Le souterrain dont il va être question fait partie d'un vaste ensemble de travaux, destinés à amener à Liverpool les eaux du lac Virnwy. Il a pour objet de leur faire franchir la rivière, la Mersey, à une certaine distance en amont de la ville, en un point où elle n'a pas plus de 240 mètres de largeur.

Les premiers projets (en dehors de ceux préparés par M. Deacon en 1877-1878) furent ceux soumis au Parlement et dressés en 1879 par M. Thomas Hawksley et M. G.-F. Deacon. L'emplacement, qui avait été adopté pour la traversée de la rivière, avait été choisi en vue de la pose d'un siphon, qui devait être immergé dans le lit même; il convenait peu pour la construction d'un souterrain. Ce projet fut vivement attaqué par les propriétaires riverains, qui prétendirent que ce siphon serait un obstacle à l'approfondissement de la rivière projeté pour les besoins de la navigation. Pendant le passage du bill au Parlement, afin de désarmer l'opposition, la Corporation de Liverpool se résigna à accepter une clause laissant au Board of trade le soin de fixer les conditions dans lesquelles la rivière serait franchie. Le projet fut pendant quelques années ajourné dans l'espoir que l'autorisation alors sollicitée pour la construction du Canal maritime de Manchester serait enfin accordée et ferait abandonner toute idée de l'approfondissement de la Mersey. Pendant ce temps la Corporation fit exécuter

des sondages dans le lit de la rivière et reconnut que le terrain pourrait à la rigueur permettre la construction d'un souterrain. L'opposition continuait d'ailleurs toujours aussi violente, si bien que le Board of trade dut en tenir compte dans sa décision intervenue en 1887; il exigea que l'ouvrage fût placé au-dessous du lit de telle manière qu'aucune de ses parties ne se trouvât à moins de 17 pieds (5,18 m.) en dessous d'un repère coïncidant sensiblement avec le niveau des basses eaux, sur toute la largeur du canal, soit 800 pieds (243,84 m.). Dans ces conditions, M. Deacon estima que la seule solution possible était une traversée en souterrain. Toute autre solution entraînant un changement de tracé, aurait obligé à perdre beaucoup de temps, à revenir devant le Parlement et aurait entraîné de grosses dépenses supplémentaires pour acquérir les terrains et les servitudes nécessaires. Cet avis fut définitivement adopté et M. Deacon invité à préparer les plans et devis d'un souterrain à percer dans la couche qui paraîtrait la plus convenable.

Première entreprise. — Il estima que le souterrain devait être percé dans l'argile à galets à environ 80 pieds (24,38 m.) de profondeur et indiqua qu'il y aurait avantage à employer un bouclier du genre de ceux qui avaient servi au souterrain de la Tour et au City and South London. Il n'estimait pas d'ailleurs qu'à cette profondeur il fût nécessaire de recourir à l'emploi de l'air comprimé. C'est dans ces conditions qu'un traité fut passé avec des entrepreneurs le 30 avril 1888 et que le travail fut commencé. Le puits, côté Cheshire, fut foncé à sa profondeur, 85 pieds (25,91 m.), le souterrain commencé et poussé jusqu'à 57 pieds 6 pouces (17,52 m.). Le puits Lancashire fut descendu jusqu'à une profondeur de 96 pieds (29,26 m.). Pour le fonçage du puits Cheshire les segments de l'enveloppe furent boulonnés et chargés de manière à les faire descendre avec la fouille. Pour le souterrain, l'entrepreneur n'employa pas de bouclier et se contenta de boiser jusqu'à ce que le revêtement fût posé. Comme le terrain devenait mauvais, il plaça un plancher étanche dans le puits et un sas à air et travailla à l'air comprimé. Mais en octobre 1889 l'eau envahit le souterrain et les entrepreneurs découragés se retirèrent.

Deuxième entreprise. — D'autres entrepreneurs furent appelés; le prix le plus bas fut demandé par MM. Cochrane and Sons. Leur offre fut agréée, mais l'entreprise, après études, déclara qu'elle trouvait plus simple d'exécuter le souterrain à un niveau plus élevé, dans les couches aquifères. MM. Cochrane préféraient renoncer à l'entreprise que de continuer le travail commencé. Ils donnaient pour motifs, que dans la partie faite du puits Lancashire, comme dans la section ouverte du souterrain, sur la rive de Cheshire, les terrains avaient été bouleversés par le mode de travail adopté, et qu'il en résulterait de grosses difficultés et bien des dangers, si l'on voulait poursuivre au même niveau ou même à une plus grande profondeur. D'un autre côté, au niveau proposé par les entrepreneurs, les sondages avaient révélé que la galerie se trouverait dans des couches aquifères meubles, de nature très variable. Dans une même section on pouvait rencontrer les terrains les plus divers. Néanmoins M. Deacon estima qu'à ce niveau le travail à l'air comprimé serait moins dangereux et autorisa le relèvement de la cote prévue de 104 pieds (31,70 m.) à celle de 52 pieds 9 pouces (16,08 m.) au-dessous du terrain naturel du côté de Lancashire. Dans ces conditions le radier devait se trouver en moyenne à 54 pieds (16,46 m.) de profondeur et le souterrain être recouvert par 22 pieds de terre (6,70 m.) et 22 pieds (6,70 m.) d'eau en haute mer.

MM. Cochrane établirent deux nouveaux compresseurs à air, deux nouvelles pompes de 40 chev., deux installations électriques et une pompe Tangye pour actionner les vérins hydrauliques du bouclier, avec accumulateur. L'un des compresseurs était un compresseur Owen (Londres) et l'autre avait été fourni par MM. Walker and Sons (Wigan); l'air comprimé était refroidi et approvisionné dans un réservoir. Les machines électriques étaient l'une de la Compagnie Brush et l'autre de la Phœnix Foundry C°. (Chester.) Ce qu'il y avait de plus remarquable dans cette installation, c'était l'emploi de la lumière électrique, qui conservait la pureté de l'air. L'électricité était amenée par deux fils, l'un pour l'aller et l'autre pour le retour du courant, mais on avait eu soin d'installer un troisième fil de réserve. Ces fils étaient attachés, ainsi que les lampes, aux boulons de joints du revêtement. Quelques lampes mobiles, au bout de fils souples, servaient à l'avancement.

Reprise des puits. — Le puits Lancashire fut conservé, et on se contenta de l'élargir à la base. Ce puits avait 10 pieds 9 pouces (3,27 m.) de diamètre extérieur et se composait d'anneaux en fonte d'une seule pièce de 4 pieds (1,22 m.) de hauteur et d'une

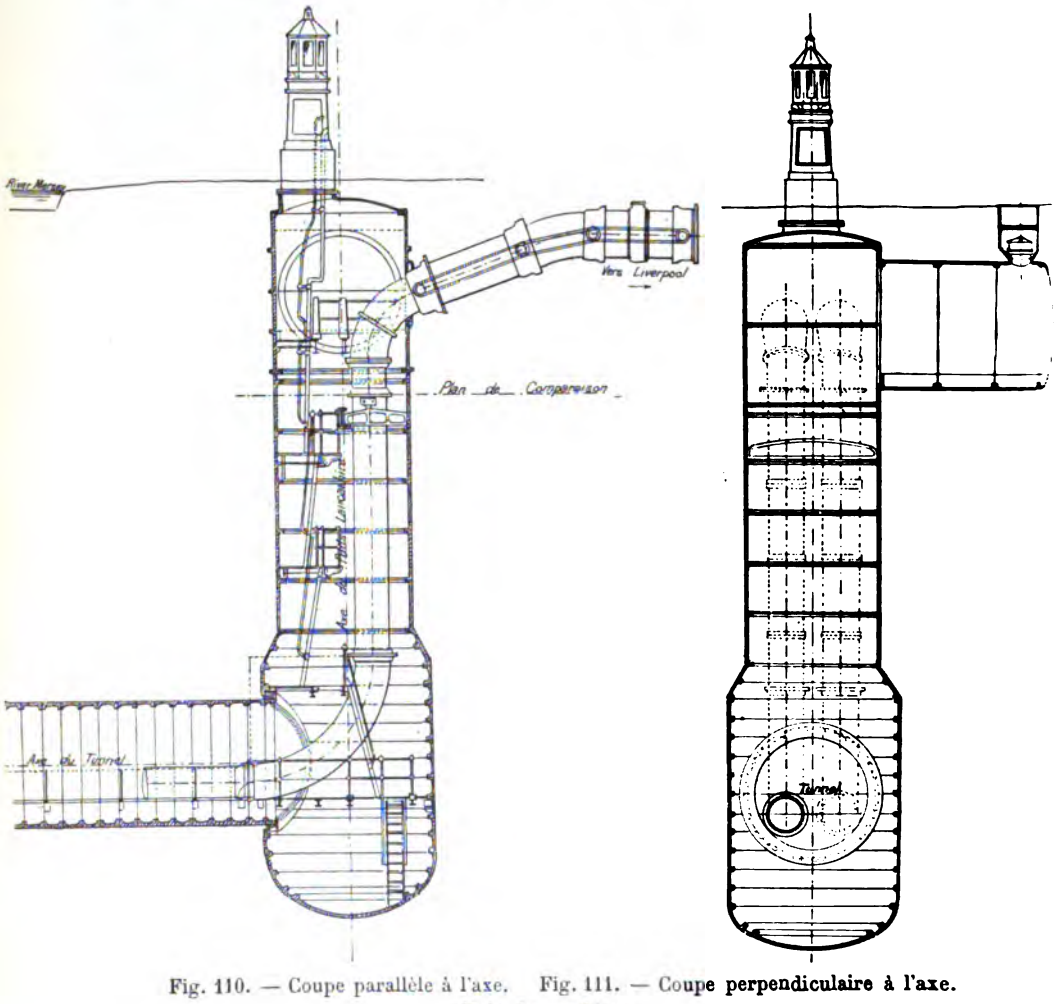


Fig. 110. — Coupe parallèle à l'axe. Fig. 111. — Coupe perpendiculaire à l'axe.
Puits Lancashire.

épaisseur variant de 1 pouce (0,025 m.) à 1 pouce 11/16 (0,04 m.) suivant la profondeur. Un anneau fut coupé à 36 pieds (10,97 m.) de profondeur et remplacé par des segments en fonte de 3 pieds (0,91 m.) sur 18 pouces (0,46 m.) de forme conique, de manière à

porter le diamètre à 13 pieds 9 pouces (4,19 m.). Ces segments avaient 1 pouce 3/4 (0,04 m.) d'épaisseur et étaient munis de

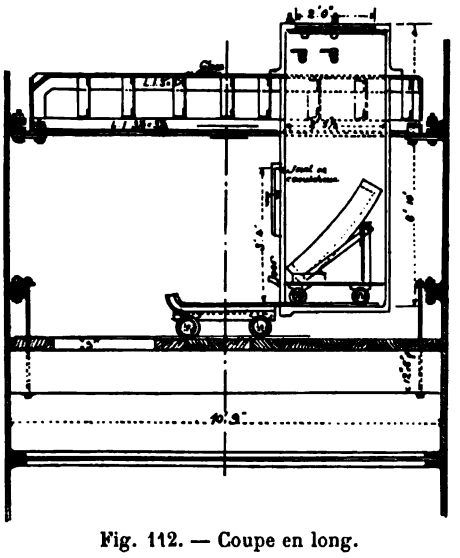


Fig. 112. — Coupe en long.

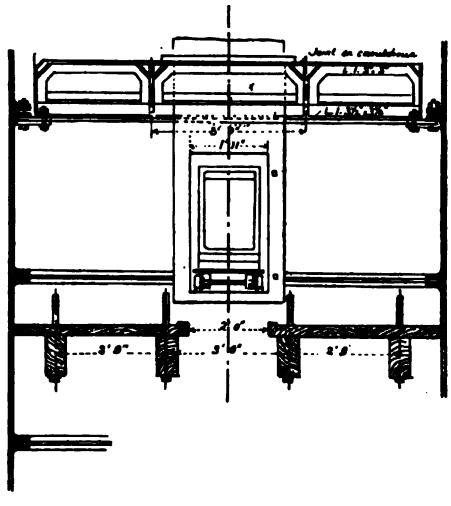


Fig. 113. — Coupe en travers.

Sas à air installé.

collets de 6 pouces (0,15 m.) réunis par des boulons de 1 pouce (0,025 m.) de diamètre. Les anneaux anciens furent ensuite succes-

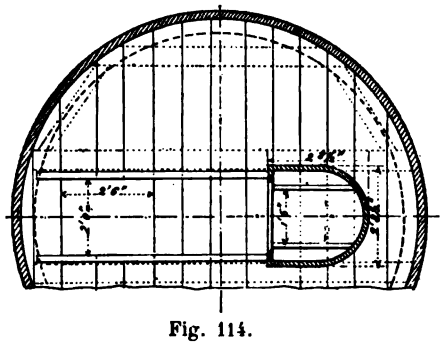


Fig. 114.
Coupe horizontale du sas à air.

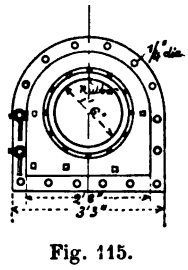


Fig. 115.
Vue par-dessus du sas à air.

sivement enlevés en descendant, et la fouille élargie pour poser les nouveaux segments (fig. 110 et fig. 111).

Ce travail dut être fait à l'air comprimé; car la fouille s'exécutait dans des sables aquifères. Il était nécessaire de glaiser la surface du sable pour éviter les pertes d'air et maintenir la pression de

20 livres (1,4 kg.) nécessaire. A cet effet dans un plancher métallique boulonné aux nervures du revêtement fut inséré (fig. 112 à 116 un sas à air de 7 pieds (2,13 m.) de hauteur et 2 pieds 6 pouces (0,76 m.) de diamètre. Le fond du puits fut également recouvert d'un revêtement en fonte, composé d'un anneau boulonné aux segments et d'une plaque courbe. Dans la

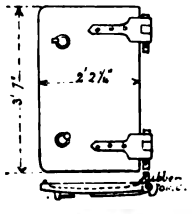


Fig. 116.
Porte de sortie du sas à air.

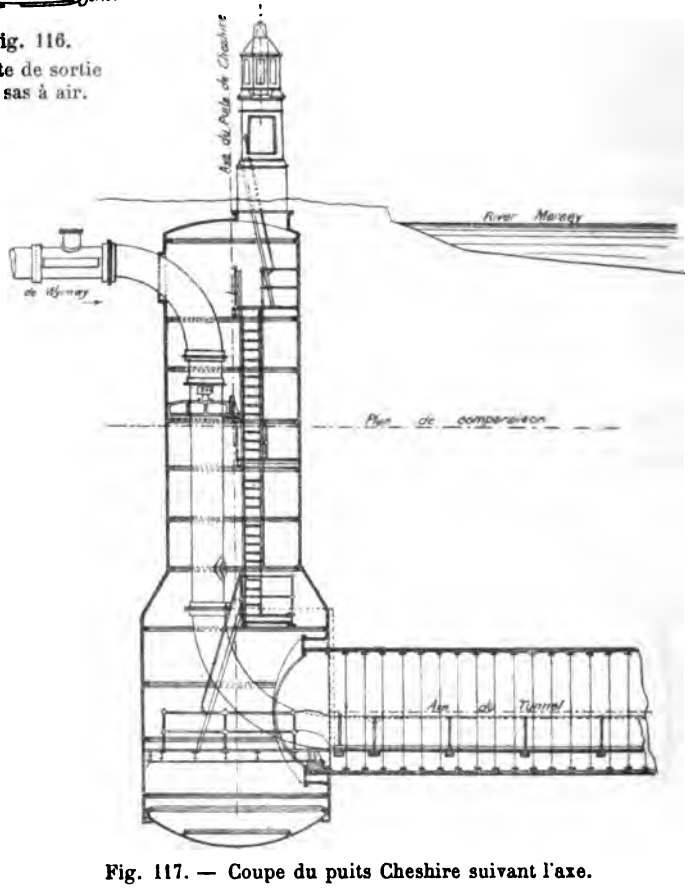


Fig. 117. — Coupe du puits Cheshire suivant l'axe.

paroi du puits était ménagée une fausse porte pour l'entrée du souterrain à 52 pieds 9 pouces (16,08 m.) de profondeur.

Sur la rive Cheshire, l'ancien puits fut abandonné et remplacé par un autre à 20 pieds (6,10 m.) plus loin de 15 pieds (4,57 m.)

de diamètre. Le fonçage se fit à niveau plein avec une drague à cuiller (dredger grab). L'enveloppe en fer descendait sous son poids, convenablement augmenté de manière à assurer une charge de 2 t. par pied courant de couteau (6 700 kg par mètre courant). Pour diminuer les frottements, le diamètre extérieur du couteau avait 1 pouce (0,025 m.) de plus que les viroles courantes.

Quand il fut arrivé à fond on immergea, avec des boîtes, du béton de manière à former un radier étanche. On put alors le mettre à sec et poser le radier en fonte. La paroi comportait, comme pour l'autre puits, une fausse porte à la profondeur de 46 pieds 6 pouces (14,17 m.) prévue pour le souterrain (fig. 117).

Revêtement en fonte. — Le souterrain devait avoir 805 pieds

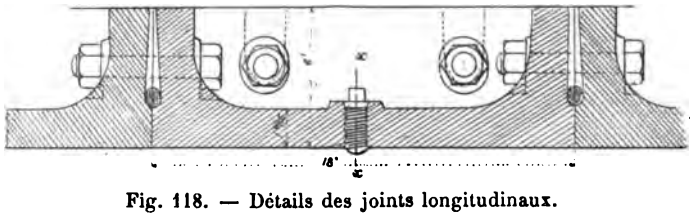


Fig. 118. — Détails des joints longitudinaux.

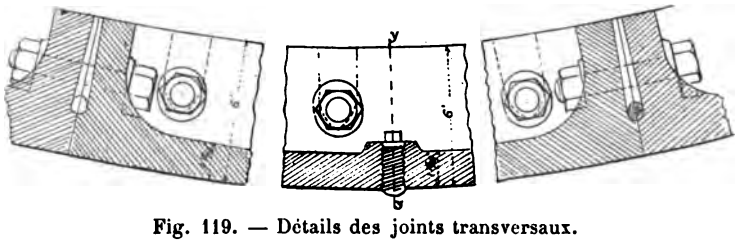


Fig. 119. — Détails des joints transversaux.

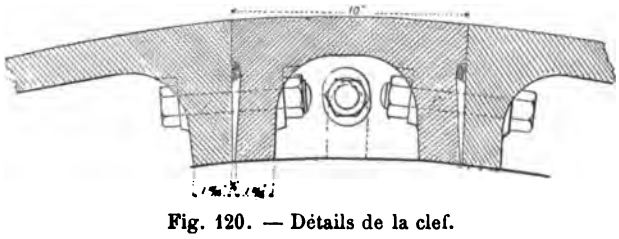


Fig. 120. — Détails de la clef.

(245,36 m.) de longueur, 10 pieds (3,05 m.) de diamètre extérieur et 9 pieds (2,74 m.) d'ouverture libre.

Les anneaux du revêtement en fonte (fig. 118 à 120) avaient

1 pied 6 pouces (0,46 m.) de longueur. Ils se composaient de 10 segments de 3 pieds (0,91 m.) de longueur suivant la circonférence pesant chacun 4 cwt (203,2 kg.) et d'une clef de 10 pouces (0,25 m.) pesant 1 cwt (50,8 kg.).

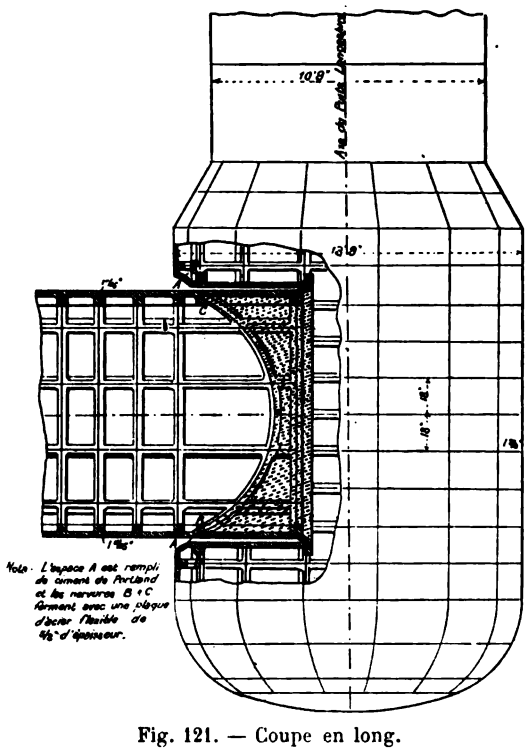


Fig. 121. — Coupe en long.

L'épaisseur de ces segments était de 1 pouce 11/16 (0,04 m.) et tous les joints tant longitudinaux que transversaux étaient entaillés de manière à pouvoir être garnis et étanchés avec du ciment de Portland. On voit nettement sur les figures 121 à 123 comment était effectuée la jonction du puits et du souterrain.

Le bouclier. — Quand les puits furent à fond, les fausses portes furent enlevées, le bouclier mis en place. On se servit à cet effet du sas à air construit pour l'achèvement du puits. Le bouclier se composait d'une enveloppe cylindrique en tôle d'acier de 3/8 pouce (0,01 m.)

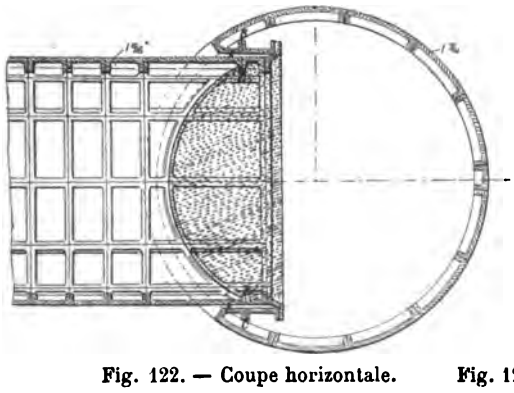


Fig. 122. — Coupe horizontale.

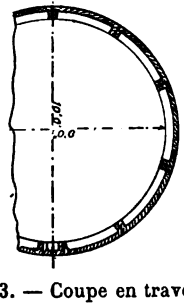


Fig. 123. — Coupe en travers.

Raccordement avec le puits.

d'épaisseur, assemblées à recouvrement avec des rivets à têtes fraisées, de manière à obtenir une surface bien unie. La longueur totale était de 11 pieds 7 pouces (3,53 m.), le diamètre

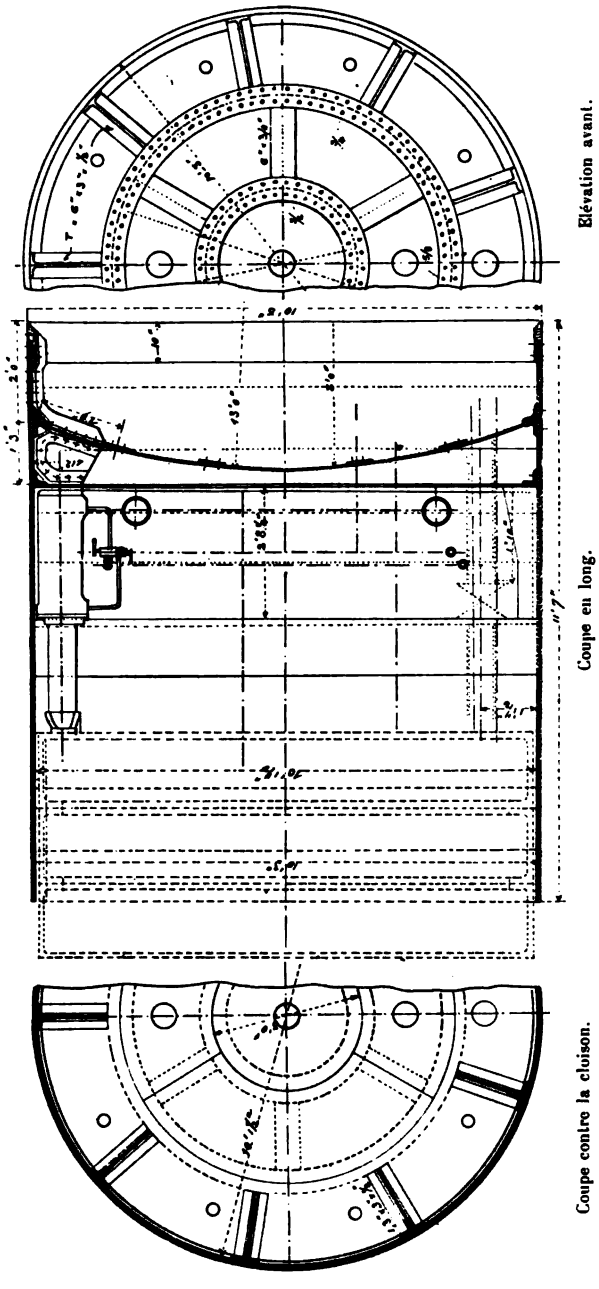


Fig. 124. — Bouclier primitif.

extérieur de 10 pieds 3 pouces (3,124 m.) et le diamètre intérieur de 10 pieds 1 pouce 1/2 (3,086 m.) (fig. 124).

Il y avait à 3 pieds (0,91 m.) en arrière de l'arête coupante une cloison composée de pièces limitées par deux circonférences concentriques et des rayons. Cette cloison était légèrement concave du côté de l'avancement et était munie d'une petite porte dans le bas. Derrière la cloison, qui était spécialement renforcée par des cornières, se trouvaient 9 vérins de 7 pouces (0,18 m.) de diamètre et 2 pieds (0,61 m.) de course (fig. 125.) Ils étaient placés dans des berceaux en fonte venus de fonte dans des segments réunis les uns aux autres par des collets et constituant un anneau à l'intérieur du bouclier (fig. 126). Les cylindres des presses étaient fixés dans ces berceaux par des étriers. Ces presses prenaient appui contre la cloison par l'intermédiaire de goussets en tôle et cornières. Leurs tiges portaient contre le revêtement en fonte.

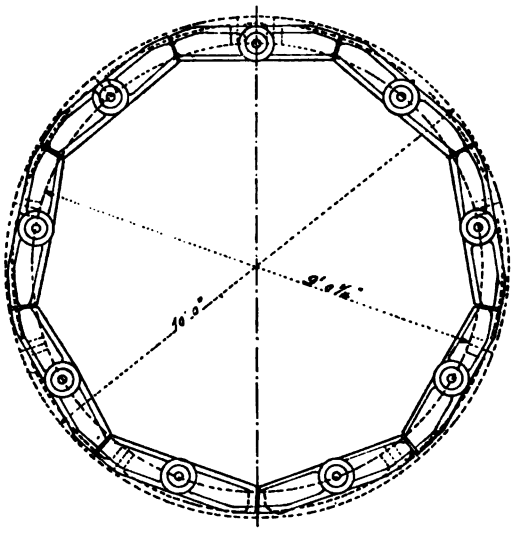


Fig. 125. — Elévation arrière du bouclier.

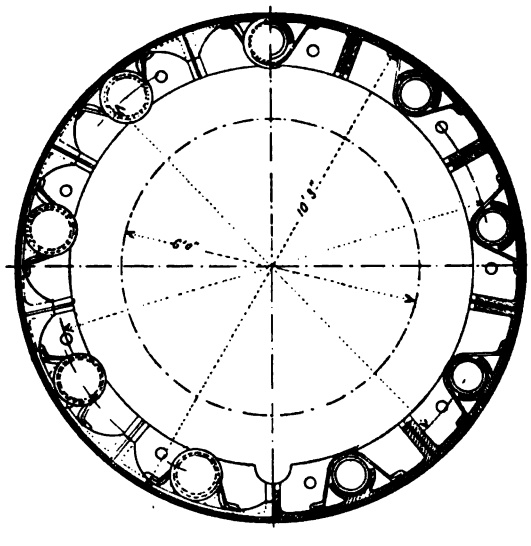


Fig. 126. — Coupe du bouclier sur les vérins.

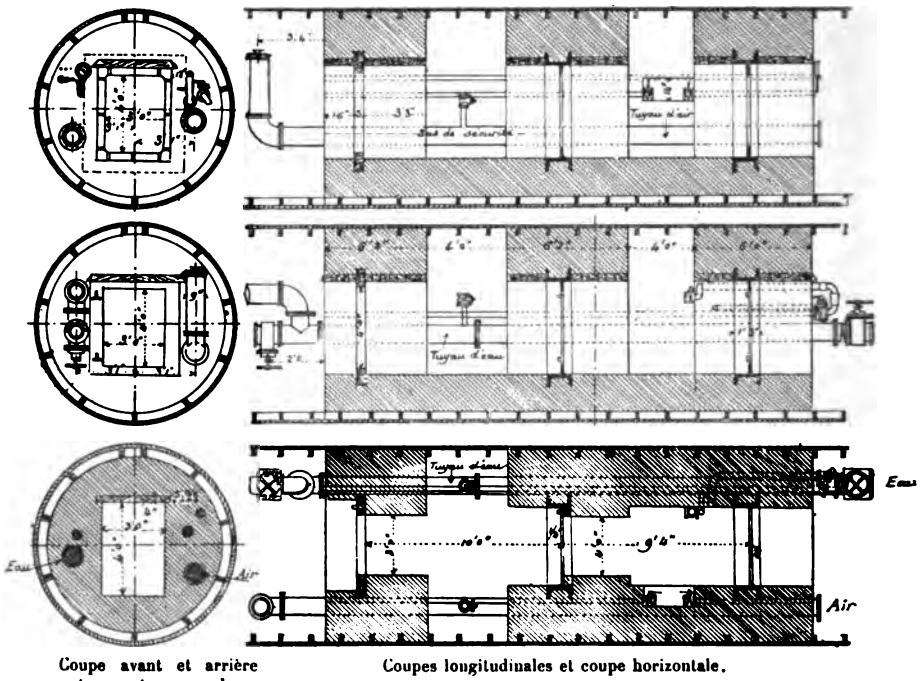
L'entrepreneur comptait exécuter le déblai au moyen de jets d'eau sous pression et avait fait ménager à cet

effet dans la cloison 10 couvertures pour y placer des lances; mais le terrain composé de couches très variables d'argile et de gravier ne se prêta pas à ce procédé et le déblai dut être fait par la petite ouverture, ménagée dans le bas, qui avait 2 pieds 6 pouces (0,76 m.) sur 1 pied 9 pouces (0,53 m.) Elle pouvait être fermée par une plaque de tôle boulonnée quand, malgré la pression, le terrain devenait peu sûr et que des éboulements étaient à craindre. Malgré cette précaution, il entra une fois dans le souterrain un peu d'eau et de sable. Quand le terrain était bon au contraire, les hommes pouvaient pénétrer jusqu'au front de taille et l'avancement devenait bien plus rapide. Dans ce cas on ouvrait non seulement la plaque d'en bas, mais aussi la plaque circulaire du milieu et la plaque radiale, immédiatement au-dessus, afin de faciliter l'entrée et la sortie. Le front de taille devait être boisé, en laissant à découvert le moins de surface possible. Le travail fut continué dans ces conditions pendant vingt semaines jusqu'au commencement de septembre et on avança de 48 yards (43,89 m.).

Sas à air. — Quand la galerie fut arrivée à cette distance, l'entreprise commença l'installation d'un sas horizontal à l'entrée du souterrain, afin de supprimer le sas vertical du puits qui causait beaucoup de retard à la sortie des déblais. Le sas était composé de deux cloisons en briques de 5 pieds 6 pouces (1,68 m.) d'épaisseur, séparées par un intervalle de 3 pieds 6 pouces (1,07 m.). Les portes en fonte battaient sur des cadres avec garnitures en caoutchouc. Les cloisons étaient traversées en outre par un tuyau de 9 pouces (0,23 m.) de diamètre muni de robinets aux deux bouts pour le passage des rails. En y adaptant un tuyau flexible, on pouvait s'en servir également pour l'évacuation de l'eau accumulée dans la chambre de travail. Un autre tuyau muni d'un manomètre indiquait à l'extérieur la pression de l'air dans le souterrain; il est inutile de parler des tuyaux d'alimentation et de vidange de l'écluse. Plus tard, il devint nécessaire d'accoler un second sas de sécurité, avec une porte en bois et tenu toujours ouvert du côté de l'intérieur pour servir d'asile aux ouvriers (fig. 127 et 128).

Quand ce sas fut mis en service, les ouvriers prétendirent qu'il y avait beaucoup plus de danger parce qu'ils n'avaient plus la res-

source de se mettre à l'abri dans la partie haute du puits et refusèrent de travailler avec les trois ouvertures dans la cloison du

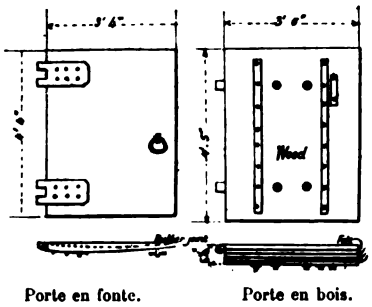


Coupe avant et arrière et coupe transversale.

Coupes longitudinales et coupe horizontale.

Fig. 127. — Sas à air.

bouclier. On ne laissa plus que l'ouverture inférieure et, sur l'indication de M. Deacon, on mit à quelques pieds en arrière une cloison en planches qui montait un peu plus haut que l'ouverture. De cette manière, si l'eau pénétrait par l'ouverture, elle ne pouvait s'étendre et était maintenue par la pression de l'air puisque l'eau elle-même masquait l'ouverture par où il aurait pu s'échapper. L'avancement par contre se trouva très ralenti et, comme on ne travaillait que du bas, il se produisait des éboulements dont on ne pouvait limiter l'étendue, de sorte que l'on retirait deux à trois fois le cube du vide. Pour



Porte en fonte. Porte en bois.

Fig. 128.

éviter ces affouillements on plaça des palplanches horizontales en fer qui traversaient la cloison. Elles avaient 6 pieds (1,83 m.) de longueur et pouvaient par suite être poussées à 3 pieds (0,91 m.) en avant du couteau dans le terrain solide. Il y en avait six de 5 pouces (0,13 m.) de largeur espacées de 12 pouces (0,30 m.). Ce toit temporaire en avant du couteau empêchait les chutes de terres.

Arrêt de l'entreprise. — Le travail marchait très lentement, quand on remarqua que le bouclier déviait sur la gauche, quoique l'on ne se servît que des vérins de gauche. Un examen attentif montra que le couteau était replié vers l'intérieur de 15 pouces (0,38 m.) sur une étendue d'environ 6 pieds (1,83 m.) et que le bouclier était fendu longitudinalement depuis la queue jusque près de la cloison. Il fallut arrêter le travail et les ouvriers réussirent non sans de grands dangers à blinder le front de taille à la hauteur du couteau.

Dans ces circonstances, les entrepreneurs se refusèrent à continuer le travail et on commençait à douter qu'il pût jamais être terminé. Il s'était écoulé quarante et un mois depuis le commencement des travaux et on n'avait encore exécuté que les deux puits et 182 pieds (55,47 m.) du souterrain. Il y avait eu des accidents fréquents et on avait failli voir tout détruit. Deux entrepreneurs successivement avaient dû se retirer et, malgré l'affirmation de M. Deacon que l'on pourrait terminer et son offre de faire le travail directement sans entrepreneur, la corporation désira avoir l'opinion d'un ingénieur, indépendant de l'affaire, sur la possibilité de l'achèvement. Sir Benjamin Baker fut appelé pour donner son avis et estima comme lui qu'il était possible de terminer le souterrain.

Sir Benjamin, dans son rapport du 3 octobre 1891, disait qu'il connaissait les détails d'exécution d'à peu près tous les travaux de ce genre qui avaient été faits en Amérique, où il a été exécuté plusieurs kilomètres de souterrain sous les lacs et les rivières, mais que nulle part le terrain n'était si variable, passant dans la faible section de 3 m. de la vase au sable mouvant, au gravier et même au ballast avec parfois des veines d'argile. Néanmoins l'expérience du passé donnait bon espoir. Pour lui, il n'y avait pas de doute que

les retards et les déboires n'étaient pas dus à l'impossibilité de faire le travail, mais à ce que les différents entrepreneurs s'étaient trompés sur les difficultés et avaient prévu des moyens insuffisants pour en venir à bout. Le premier, qui savait par les sondages qu'il aurait affaire à de l'argile avec du gravier et du sable, ne s'outilla que pour l'argile, tandis que le second prévit un bouclier, qui aurait pu à la rigueur convenir au sable et au gravier, mais n'était pas adapté aux terrains variés qu'il savait exister. Il ne fallait pas oublier que le bouclier faisait partie de l'outillage de l'entreprise, que les ingénieurs n'avaient pas d'ordres mais tout au plus des conseils à donner. Sir Benjamin estimait que les entrepreneurs avaient essayé une solution qui n'avait pas été tentée avant eux et que les inventeurs heureux sont rares. Il aurait fallu un bouclier capable d'agir dans le gravier, le sable mouvant et l'argile dans tout ordre de stratification et d'empêcher l'échappement de l'air comprimé. Il concluait qu'on devait pouvoir y arriver et achever le travail assez rapidement.

Reprise du travail. — M. Deacon avait déjà proposé de faire le travail sans l'intermédiaire d'un entrepreneur. Dans les circonstances présentes, il n'y avait pas d'autres ressources à moins de renoncer au souterrain et de solliciter une nouvelle autorisation du Parlement pour un autre tracé qui aurait forcément entraîné l'abandon d'une grande partie de l'aqueduc déjà exécuté. Dans un rapport du 13 octobre 1891, il s'exprimait ainsi : « Avec un bouclier « approprié aux différents terrains rencontrés, il serait possible de « terminer le travail pour l'été prochain..... Un examen répété « des travaux de cette nature m'ont convaincu de la possibilité de « mener l'entreprise à bonne fin sans dépenses exagérées. Je dois « rappeler que je n'ai pas proposé cette solution, mais qu'elle a été « imposée, à mon avis, inutilement, par le Board of trade, ce qui « a retardé l'achèvement d'une entreprise dont il est une partie « peu importante mais essentielle. Il ne reste plus qu'à pousser le « travail après mûre réflexion, avec une énergie soutenue et pleine « confiance dans le résultat. » Ces conseils furent entendus et l'achèvement du travail eut lieu non pas à l'été, comme M. Deacon l'avait prévu, mais en mars en moins de quatre mois et demi.

Le travail fut donc repris sous la direction de M. Deacon. Il s'assura le concours de M. Arthur Cochrane, l'un des entrepreneurs, qui avait acquis beaucoup d'expérience au cours du travail, pour diriger les ouvriers et les approvisionnements. M. A.-W. Brightmore fut conservé comme ingénieur résident.

Consolidation du bouclier. — Il eût été très difficile de remplacer le bouclier; il prit donc le parti de le réparer et de le renforcer, malgré la très mauvaise qualité du terrain dans lequel on

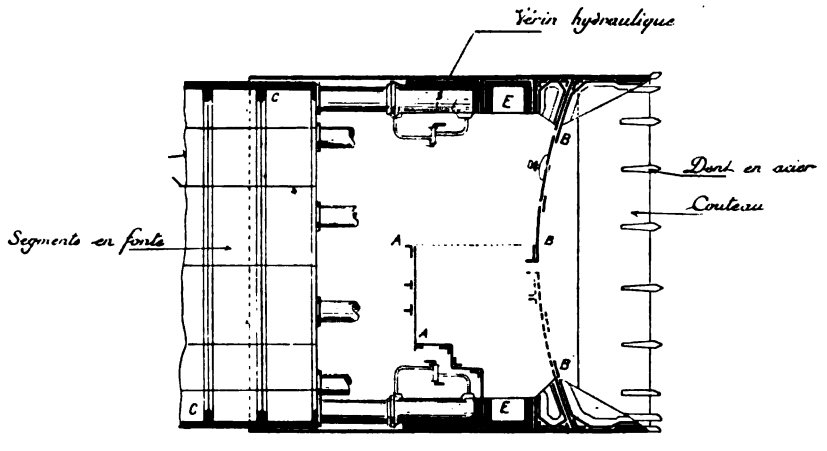


Fig. 129. — Croquis du bouclier renforcé.

se trouvait à ce moment. Ce travail dura environ sept semaines. On découpa la partie endommagée du couteau et on la remplaça par de nouvelles plaques boulonnées; pour éviter le retour d'un semblable accident, on doubla le nombre des goussets qui soutenaient l'avant-bec, et on le munit de 18 dents en acier de 6 pouces (0,15 m.) de longueur destinées à disloquer le terrain en avant du couteau. En outre, ces dents faisaient saillie de 1 pouce (0,025 m.) sur la circonférence, de manière à découper des rainures, en dehors du passage du bouclier et à diminuer ainsi le frottement (fig. 129).

La cloison fut aussi modifiée. On a vu qu'il y avait une porte circulaire centrale et deux portes en forme de secteurs, l'une au-dessus et l'autre en dessous. On laissa intacte la partie supérieure jusqu'à 3 pouces (0,076 m.) au-dessous de l'axe; mais on trans-

forma la partie inférieure de manière à la constituer de 3 bandes horizontales s'étendant sur toute la largeur du bouclier et pouvant s'ouvrir indépendamment les unes des autres, suivant la qualité du sol. La cloison provisoire en planches, qui avait été mise en arrière du diaphragme pour arrêter l'eau et qui avait donné de bons résultats, fut remplacée, sur le conseil de sir Benjamin Baker, par une installation fixe. Ce second diaphragme A, placé à quelques pieds en arrière du premier et monté un peu au-dessus des ouvertures, avait pour but d'éviter qu'en cas d'échappement d'air l'eau et la terre ne se précipitassent dans le souterrain et ne le remplissent jusqu'au-dessus de l'ouverture de la cloison B. Quand la partie indiquée en pointillé était ouverte, les ouvriers pouvaient se tenir en toute sécurité entre les deux diaphragmes ou même en avant du premier, puisqu'ils avaient une retraite assurée. Ce dispositif supposait toutefois qu'il resterait assez de pression dans la galerie pour maintenir l'eau entre les deux cloisons; par surcroît de précautions, on avait préparé un couvercle A B, de manière à enrayer l'invasion du souterrain.

Le nombre des vérins fut porté de 9 à 10, en nombre égal à celui des joints longitudinaux du revêtement métallique, en face desquels ils furent placés, afin d'éviter la rupture des nervures, comme cela s'était déjà produit. Comme ils ne se trouvaient plus en face des points du diaphragme renforcés pour recevoir la poussée, et qu'il était d'autre part avantageux de consolider le bouclier et de reporter l'effort directement sur l'enveloppe, un fort anneau en fonte E fut ajouté entre la cloison et les vérins.

Environ six semaines après la mise en marche, la fissure longitudinale dont il a été parlé s'aggrava et il se forma une fissure transversale dans le bas de la chemise sur un joint. La résistance à l'avancement s'accrut considérablement parce que l'arête de la déchirure s'était repliée et labourait le sol. Il fallut arrêter. Quoique l'on fût dans un très mauvais sol et que la pression d'eau s'élevât à 54 pieds (16,46 m.) à marée haute, on enleva un morceau de l'enveloppe sur 6 pieds 1/2 (1,98 m.) de largeur et 9 pieds (2,74 m.) de développement sur la circonférence et on remit de nouvelles tôles boulonnées à l'anneau de fonte E, mais sans autre attache, de sorte qu'elles recouvraient simplement la plaie et étaient sou-

tenues et entraînées par l'anneau de fonte. La partie de l'enveloppe, qui avait été coupée, fut abandonnée dans le sol. Cette réparation prit douze jours, mais on n'eut plus ensuite à retoucher au bouclier.

Marche du travail. — Le travail fut repris dans ces conditions le 12 novembre 1891. Il n'y avait alors de fait par l'entreprise de MM. Cochrane que 182 pieds (55,47 m.). Le premier jour, on n'enleva que la bande inférieure de la cloison et on conserva le diaphragme de sécurité à pleine hauteur. Les hommes ne tardèrent pas à prendre confiance et l'on put enlever le lendemain les deux autres bandes. Le travail marcha alors rapidement, d'autant plus que l'on alloua aux hommes un boni de 1 livre (25 fr.) par pied (0,30 m.) en sus de 18 (5,49 m.) par semaine. Ils arrivèrent à faire en une semaine 57 pieds (17,37 m.). Un mois après la reprise, le bouclier avait avancé de 120 pieds (36,57 m.). Le 11 février, il y eut cependant un éboulement; la terre passa par l'ouverture jusqu'au second diaphragme; le couvercle fut immédiatement placé. Après un arrêt de trois ou quatre heures, la presssion remonta; le couvercle fut enlevé et on put constater que le sable avait séché. On ne tarda pas à s'apercevoir que la cloison butait contre un tronc d'arbre, couché parallèlement à l'axe du souterrain, en haut et à gauche. Il fallut le débiter par longueurs de 18 pouces (0,467 m.), correspondantes à une course, à l'aide du trou à main de 6 pouces (0,15 m.), qui avait été ménagé primitivement dans la cloison à 2 pieds 6 pouces (0,76 m.) au-dessus de l'axe. Cet arbre avait 14 pieds (4,27 m.) de longueur et 12 pouces (0,305 m.) de diamètre. On perdit énormément de temps à l'enlever par morceaux, car il était encore dur et bien conservé à l'intérieur.

Le travail se poursuivit sans incident jusqu'à un point situé au-dessous de la partie la plus profonde de la rivière. Le matin du 18 février 1892, la terre commença à tomber dans la partie haute du couteau; les hommes se retirèrent et travaillèrent entre les deux cloisons. Comme le bouclier n'avançait pas, le couvercle du trou à main fut enlevé pour voir ce qui se passait et on reconnut qu'il y avait encore un tronc d'arbre buté contre la cloison. Pendant cet examen, il s'échappa beaucoup d'air, la pression tomba à 4 livres (0,280 kg.); la partie inférieure devint de plus en plus mouillée;

il se déclara d'abord des suintements, puis une venue d'eau abondante. Les hommes firent tout ce qu'il purent pour fermer le couvercle, mais malgré tous leurs efforts ils ne purent y réussir et se sauvèrent dans l'écluse de sûreté. Quand on voulut vider l'eau qui s'était accumulée avant de rentrer, on s'aperçut que le tuyau d'évacuation était bouché par le sable. Il fallut faire des trous dans la porte de l'écluse pour la faire écouler et la mener au puits pour être pompée. Les ouvriers purent pénétrer dans le souterrain seize heures après l'accident. Ils y trouvèrent 250 yards cubiques (191 m³) de sable et de vase, et constatèrent que l'eau était montée environ au tiers de la hauteur. Le premier travail consista à enlever le déblai; en même temps un cube analogue d'argile fut coulé dans le lit de la rivière où il s'était produit une forte dépression exactement au-dessus du bouclier. Le lit fut en outre garni d'une chemise d'argile, prolongée jusqu'au niveau des basses eaux de la rive Cheshire, pour éviter le retour d'un accident analogue dans le parcours qui restait à faire.

L'interruption du travail fut de huit jours. Quand il fut repris. on n'enleva par précaution que les deux bandeaux inférieurs. En arrivant à 15 pieds (4,57 m.) du puits Cheshire, l'ouverture fut encore réduite; non seulement on ne laissa qu'un bandeau ouvert, mais encore on ajouta une planche, qui ne laissait qu'un vide de 3 pieds 9 pouces (1,14 m.) de longueur sur 12 pouces (0,305 m.) de hauteur. Comme on redoutait beaucoup la traversée du terrain bouleversé par le fonçage du puits, on tint constamment le couvercle à moitié fermé et on se servit des palplanches posées pour former toit en avant du couteau. On s'avança ainsi avec les plus grandes précautions jusqu'à ce que les dents d'acier touchent la paroi du puits. On reconnut que le terrain était moins mauvais qu'on aurait pu le craindre et on se décida à démonter la fausse porte et à pousser le bouclier dans le puits.

Le travail de percement se termina ainsi le 22 mars 1892. Depuis le 12 novembre 1891, date de la reprise de l'avancement sous la direction de M. Deacon, on avait parcouru une distance de 618 pieds (188,36 m.), avec une vitesse moyenne de 34 pieds (10,36 m.) par semaine, sans tenir compte des arrêts. La plus grande longueur exécutée en une semaine fut de 57 pieds (17,37 m.).

Au début, la pression d'air était maintenue à environ 17 livres par pouce carré (1,2 kg.). Mais quand le travail avança, elle diminua graduellement pour tomber à 10 livres (0,7 kg.). La pression la plus élevée, 25 livres (1,7 kg.), fut nécessaire pour l'élargissement du puits de Lancashire. Dans le souterrain, la variation de la pression dépendait beaucoup plus de la nature du sol que de la hauteur d'eau. Une variation de charge de 7 livres (0,5 kg.), due à la marée, ne nécessitait pour l'air comprimé qu'une variation de 2 livres (0,4 kg.) et souvent la pression d'air n'était que la moitié de celle due à la charge d'eau.

Avant l'emploi des dents en acier au couteau, la pression dans les vérins atteignit souvent 4 000 livres (1 814 kg.) ; quand on les eut posées, cette pression ne dépassa jamais 3 000 livres (1 360 kgs.) et descendit quelquefois à 1 100 livres (499 kg.). Après l'irruption de février, on maintint les vérins constamment en charge, de sorte que le bouclier avançait à chaque pelletée de déblai.

Chaque équipe travaillait 12 heures et se composait de 7 terrassiers, 2 hommes à l'écluse, sans compter les rouleurs. Il s'établit une certaine rivalité entre les deux équipes de jour et de nuit pour obtenir le plus bel avancement. La course correspondant à un anneau était de 18 pouces (0,467 m.) ; elle fut exécutée une fois en cinquante minutes, y compris le montage de l'anneau de revêtement en fonte. Une autre équipe travaillait en arrière à calfater les joints en ciment.

Conclusions. — Ce travail fait le plus grand honneur pour sa rapidité d'exécution aux ingénieurs MM. Deacon et Brightmore.

On doit en retenir qu'à défaut de la division en cellules, difficile avec les petits diamètres, il faut, surtout si l'ouverture est en bas, se garantir contre l'invasion d'eau par des procédés spéciaux. On doit en outre remarquer combien d'ennuis et de retards a entraînés la construction d'un bouclier trop faible.

CHAPITRE VII

SOUTERRAINS DE GLASGOW SOUS LA CLYDE

I

SOUTERRAIN DU PORT

(1890-1893)

Exposé. — Ce souterrain a été construit pour les besoins de la circulation entre les deux rives de la Clyde, sur laquelle il était

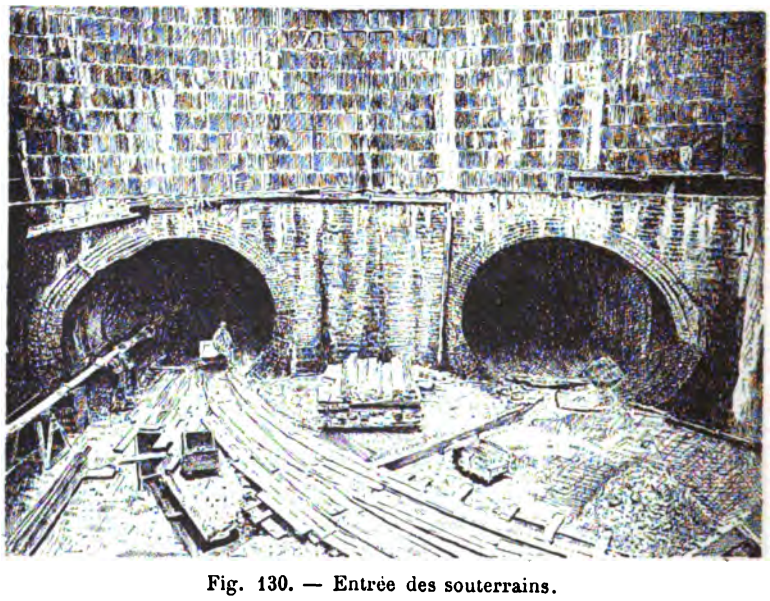


Fig. 130. — Entrée des souterrains.

impossible de jeter un pont dans toute l'étendue du port sur plusieurs kilomètres de distance. Le projet en fut présenté par

MM. Simpson et Wilson, ingénieurs très expérimentés dans la construction des souterrains. Quand le parlement eut accordé les autorisations en 1890, ils prirent comme entrepreneurs MM. Hugkennedy and Sons.

Il y a, en réalité, trois galeries espacées de 2 pieds (0,61 m.) les unes des autres. Les deux galeries nord et sud (fig. 130) sont

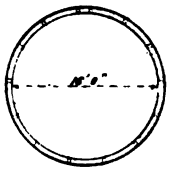


Fig. 131. — Coupe du revêtement métallique.

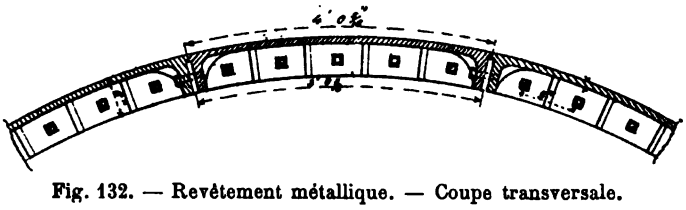


Fig. 132. — Revêtement métallique. — Coupe transversale.

destinées à la circulation des voitures et la galerie intermédiaire aux piétons. Ces galeries sont exécutées soit en fonte (fig. 131, 132, 133) avec un diamètre de 16 pieds (4,87 m.) sous la rivière, soit en briques (fig. 134) avec un diamètre de 18 pieds (5,49 m.) dans l'argile à galets. Au point le plus élevé, elles sont seulement à

Fig. 133. — Revêtement métallique. Coupe longitudinale.

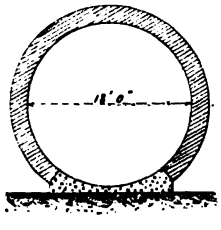


Fig. 134. — Coupe du revêtement en maçonnerie.

15 pieds (4,57 m.) sous la rivière dont la profondeur varie de 35 (10,67 m.) à 46 pieds (14,02 m.) suivant la marée. L'accès se fait par deux puits (fig. 135), le puits de la rive nord qui est à 400 pieds (121,92 m.) à l'ouest de Finnieston-Street et à 170 pieds (51,81 m.) du mur de quai, et le puits de la rive sud qui est en bordure de Govan Street et à 120 pieds (36,58 m.) du mur du quai. Comme la rivière a 415 pieds (126,49 m.) de largeur, la distance d'un puits à l'autre est de 705 pieds (214,88 m.). Ces puits circulaires ont un diamètre de 76 pieds (23,16 m.) et une profondeur de

72 pieds 6 pouces (22,09 m.) pour le puits nord et de 75 pieds 6 pouces (23,01 m.) pour le puits sud. Les voitures y accèdent par six ascenseurs de 5 tonnes 1/2 (5 600 kg.). Quant aux piétons, ils descendent par un escalier à 34 pieds (10,36 m.) de profondeur jusqu'à une rampe inclinée à 1 pour 3, avec des marches, qui les conduit au souterrain.

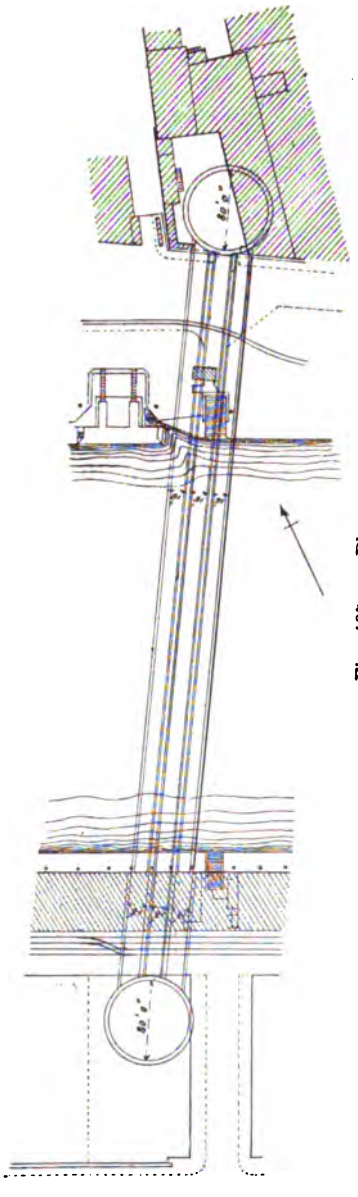


Fig. 135. — Plan.

Fonçage des puits. — Le puits sud fut commencé le 3 février 1890. Le détail de ces puits se trouve sur les figures 136 et 137. La partie supérieure et la base sont en maçonnerie de briques, mais la partie intermédiaire se compose de deux enveloppes en fonte d'un 1/2 pouce (0,127 m.) d'épaisseur, entre lesquelles a été coulé du béton formé de 5 parties de sable et pierre pour 2 de ciment.

La fouille atteignit l'eau, après avoir traversé le sable sur 14 pieds (4,27 m.). On monta alors sur la trousse coupante les deux premiers rangs de segments en fonte de 2 pieds (0,61 m.) de hauteur chacun. Les autres anneaux ne furent montés que successivement suivant les besoins de l'avancement. Après avoir installé des pompes on reprit la fouille; en travaillant jour et nuit avec des équipes de 30 hommes, on descendit de 8 pieds (2,44 m.) par mois, ce qui correspond à une fouille de 2 000 yards cubiques (1 500 m³). La fouille seule revint à 500 livres (12 500 fr.). Le

sable se continua sur 48 pieds (14,63 m.) ; à cette profondeur on atteignit l'argile. La fouille devint beaucoup plus coûteuse et, en

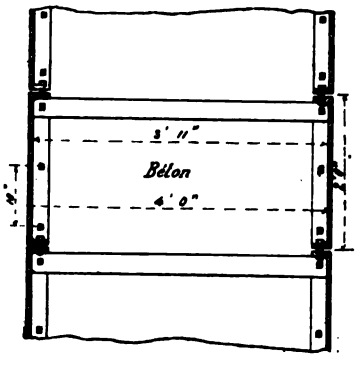


Fig. 136. — Coupe transversale.

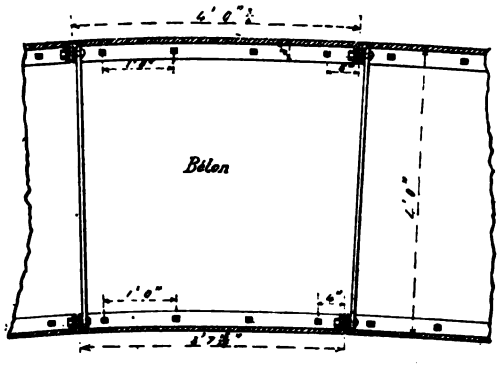


Fig. 137. — Coupe horizontale.

Double paroi du puits.

raison de l'inclinaison de 1 à 4 du nord au sud du banc d'argile, on eut beaucoup de peine à maintenir l'aplomb du puits. La

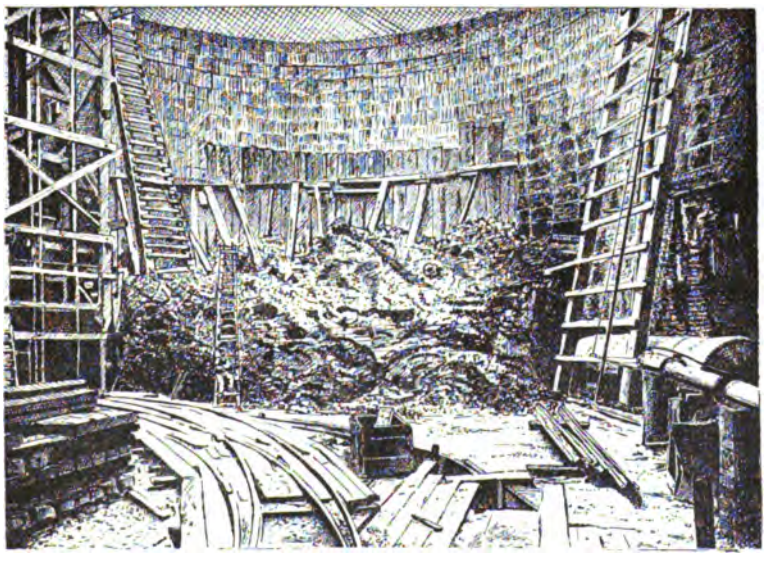


Fig. 138. — Puits sud. — Blindage provisoire de la partie inférieure.

paroi nord, qui frottait contre l'argile sur une bien plus grande hauteur, descendait plus lentement et le puits avait une tendance

à s'incliner vers le sud. Le faux aplomb atteignit 1 pied (0,305 m.) et il fallut charger la paroi nord de plusieurs tonnes de gueuses pour redresser le puits. En même temps pour ramollir et faciliter la descente de ce côté, on fit une tranchée autour du puits et on la remplit d'eau qui, en pénétrant, rendait l'argile moins ferme et diminuait le frottement. On remarquera que Brunel avait déjà eu recours à cet artifice.

Quand on fut arrivé à 54 pieds (16,46 m.), on arrêta la descente et on décida de reprendre les 21 pieds 6 pouces (6,55 m.), qui res-

Fig. 139. — Puits sud. — Achèvement de la partie inférieure.

taient à foncer, en sous-œuvre, en maçonnerie de briques. Les parois furent exécutées sur une épaisseur de 4 pieds (1,22 m.) dans des fouilles de 20 pieds (6,10 m.) de largeur qui se maintenaient très bien à pic sans boisage. Cependant du côté sud, où le puits avait pénétré dans l'argile à peine de 6 pieds (1,83 m.), le sable se fit jour avec l'eau et il fallut ajourner la construction de la paroi et maintenir provisoirement les terres avec des pieux de 12 pouces × 12 pouces (0,30 m. × 0,30 m.) battus à 40 pieds (12,19 m.) de profondeur. Ces pieux (fig. 138) furent battus en mars 1891 et subsistèrent jusqu'à la fin de mars 1893, époque à laquelle on recon-

nut que le sable s'était tassé et asséché, et on put faire la reprise en sous-œuvre en procédant très lentement et par petites parties pour éviter les éboulements de ce sable qui était très fin (fig. 139). Ce travail avait pu sans inconvénient être ajourné, puisque les entrées du souterrain se trouvaient sur la face opposée.

Au fond du puits, on fit un radier en béton de 2 pieds (0,61 m.) d'épaisseur fondé sur l'argile. La dépense totale pour ce puits s'éleva à 12 000 l. (300 000 fr.).

Puits nord. — Dans ce puits il n'y avait pas d'argile mais uniquement du sable et des plus mauvais, sur toute la hauteur. Le travail se fit dans la partie haute jusqu'à l'eau sur 17 pieds (5,18) en briques comme sur l'autre rive. Mais une fois que l'on eut atteint l'eau, on descendit la partie métallique jusqu'au fond. L'avancement ne fut que de 6 pieds (1,83 m.) par mois, à cause de la grande quantité d'eau; en arrivant en bas on enlevait 1 200 gallons (5,500 m³) par minute. Au début on se servit d'une grosse pompe Tangye, que l'on dut bientôt remplacer, en raison de l'augmentation de la venue d'eau, par plusieurs autres plus petites du même type; à la fin du travail, on employait 3 pompes de 500 gallons (2,271 m³) chacune. On installa ces pompes dans la fouille sur un échaufaudage monté sur pieux. Quand le déblai atteignait le bas des pieux, on en battait d'autres tout contre les précédents dont on boulonnait la tête aux pieds de ceux de la première volée. Quand on arriva en bas, on avait un échafaudage qui régnait sur toute la hauteur avec plusieurs plates-formes réunies par une série d'entretoises en diagonales. On descendait les pompes dès que l'aspiration atteignait 15 à 20 pieds (4,57 m. à 6,10 m.). La plus grande hauteur de refoulement fut de 60 pieds (18,29 m).

Le terrain traversé était si ramolli par l'eau que pendant la descente il fut complètement inutile de charger le puits et qu'il fallut au contraire veiller à ce que les segments ne se séparent pas les uns des autres. Quand le puits fut arrivé à fond, l'abondance d'eau était encore telle que non seulement on dut mettre un radier étanche, mais que l'on résolut de mettre une troisième enveloppe dans le puits. Pour l'exécution du radier, on plaça d'abord une couche de 18 pouces (0,47 m.) de sacs de ciment pesant 2 cwt

(116 kg.) au-dessus de laquelle on ménagea, dans la couche de béton de 10 pieds (3,05 m.) d'épaisseur, un puisard dont l'eau s'écoule maintenant par un drain vers le puits sud, où sont les installations permanentes d'épuisement. En exécutant ce radier on le relia avec le plus grand soin aux parois du puits en injectant du ciment dans le joint. On monta ensuite l'enveloppe intérieure, composée de segments en fonte un peu plus épais que ceux qui avaient servi au fonçage, et dans le vide de 2 pieds (0,61 m.) qui existait entre cette enveloppe et les parois on coula du béton. Le diamètre du puits qui était primitivement de 80 pieds (24.38 m.), se trouva ainsi réduit à 76 (23,16 m.) La même opération fut faite à titre de précaution dans le puits sud. La partie haute fut d'ailleurs dans les deux puits conservée en briques.

Le travail de fonçage avait été attaqué le 28 avril 1890 ; les travaux furent achevés en juillet 1891. La fouille avait été descendue, y compris l'épaisseur de la couche de sacs et du béton du radier, de 11 pieds 6 pouces (3,51 m.), à 84 pieds (25,60 m.).

Les dépenses s'élevèrent à peu près au même chiffre que dans l'autre puits ; les épuisements dans le sable se trouvèrent compensés par les difficultés de descente dans l'argile.

Les souterrains. — On a vu qu'il y avait trois galeries de 16 pieds (4,87 m.) de diamètre. Les deux souterrains (fig. 140)

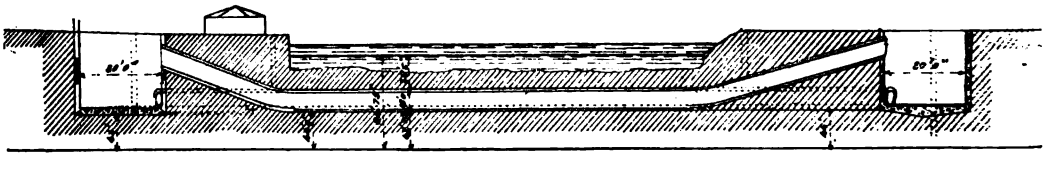


Fig. 140. — Coupe en long.

destinés au passage des voitures sont horizontaux, et celui destiné aux piétons, réuni aux puits par des rampes, est parallèle et au même niveau sur toute la traversée de la rivière.

Les souterrains furent attaqués dans d'excellentes conditions en partant du puits sud, en pleine argile compacte que l'on conserva d'ailleurs sur un tiers du parcours. On put par suite se contenter, au départ, d'un simple revêtement en briques que l'on arrêta,

toutefois au mur du quai. Afin de pouvoir construire le bouclier à l'intérieur et à l'abri de la partie faite, on donna à cette première partie un diamètre de 18 pieds (5,48 m.). Sur le reste du parcours, on employa un revêtement métallique dont le détail est donné dans les figures 132 et 133.

L'air comprimé. — La première machine à air comprimé qui fut employée avait été fournie par MM. John Slee and C°. Elle se composait d'un cylindre à vapeur de 24 pouces (0,61 m.) de diamètre accouplé avec un cylindre à air de 26 pouces (0,66 m.) ; la course commune était de 3 pieds (0,91 m.) ; cette machine

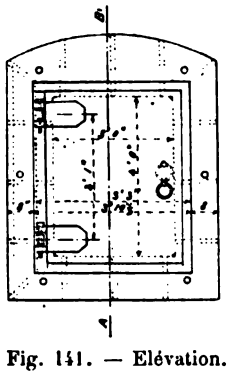


Fig. 141. — Elévation.

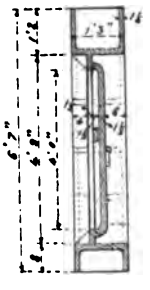


Fig. 142. — Coupe.

Porte en fonte du premier sas à air.

pouvait donner 300 à 350 coups de piston à la minute, sans que les clapets produisent le moindre bruit. La vapeur était fournie à la pression de 70 livres (4,9 kg.) par trois chaudières Lancashire. L'air était refoulé avant d'être distribué dans un grand réservoir, placé au fond du puits et que l'on aperçoit à droite dans la figure 138.

Deux types de sas à air furent employés. L'un d'eux était établi dans un massif de maçonnerie dans lequel était ménagé un passage de 5 pieds (1,52 m.) de haut, 3 pieds 6 pouces (1,07 m.) de large et 19 pieds (5,79 m.) de longueur. Les divers tuyaux nécessaires au service étaient scellés dans le même massif. Les portes (fig. 141 et 142) étaient en fonte de 1 pouce (0,025 m.) d'épaisseur et portaient sur des cadres garnis d'une lame de caoutchouc. L'autre sas était entièrement métallique (fig. 143 à 146). Il était

fixé dans une cloison métallique raidie par des poutres en fer verticales et construit tout en tôle ; sa hauteur était de 5 pieds 7 pouces (1,70 m.) et sa largeur de 4 pieds 2 pouces (1,27 m.).

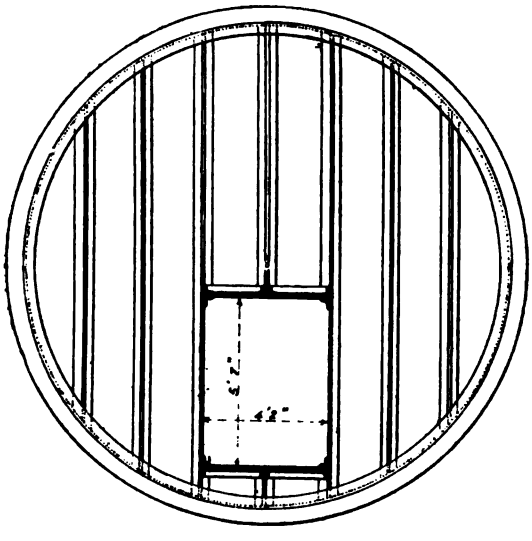


Fig. 143. — Elévation du deuxième sas à air.

Les boucliers. — Les boucliers qui ont servi aux trois galeries n'étaient pas entièrement semblables. Le premier bouclier employé est représenté par les figures 147 et 148. Son enveloppe extérieure avait 17 pieds 3 pouces (5,25 m.) de diamètre et 7 pieds (2,13 m.) de longueur. Elle se composait de deux épaisseurs de plaques d'acier de 3/8 pouce (0,01 m.) rivées. Le couteau était à 1 pied (0,30 m.) en avant du diaphragme. Quand on attaqua la seconde galerie, quoiqu'il ne se fût pas produit d'accident, on jugea prudent de renforcer ce type (fig. 149 à 153). L'enveloppe extérieure fut faite plus longue avec 8 pieds 6 pouces (2,59 m.). On plaça devant le diaphragme un anneau destiné à renforcer le couteau et on munit

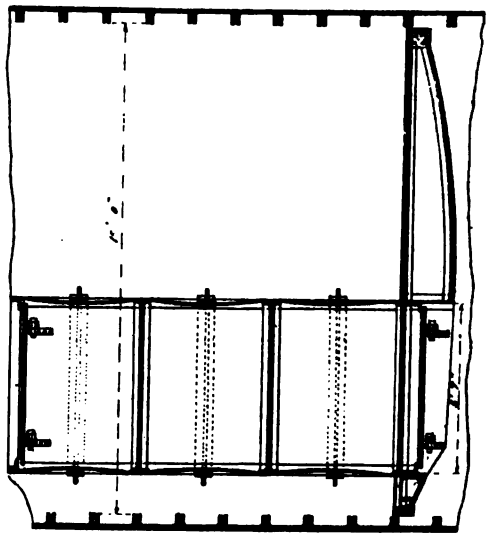


Fig. 144. — Coupe en long du deuxième sas à air.

cette cloison de deux portes glissantes de 6 pieds (1,83 m.) de hauteur sur 4 pieds 2 pouces (1,27 m.) de largeur, dont on n'eut

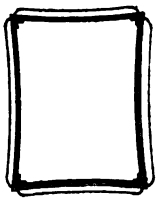


Fig. 145. — Coupe transversale.

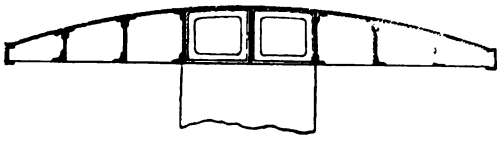


Fig. 146. — Plan.

Deuxième sas à air.

d'ailleurs jamais à se servir. Sur le bouclier (fig. 153) se trouvaient deux pompes à bras destinées à alimenter 13 vérins hydrauliques

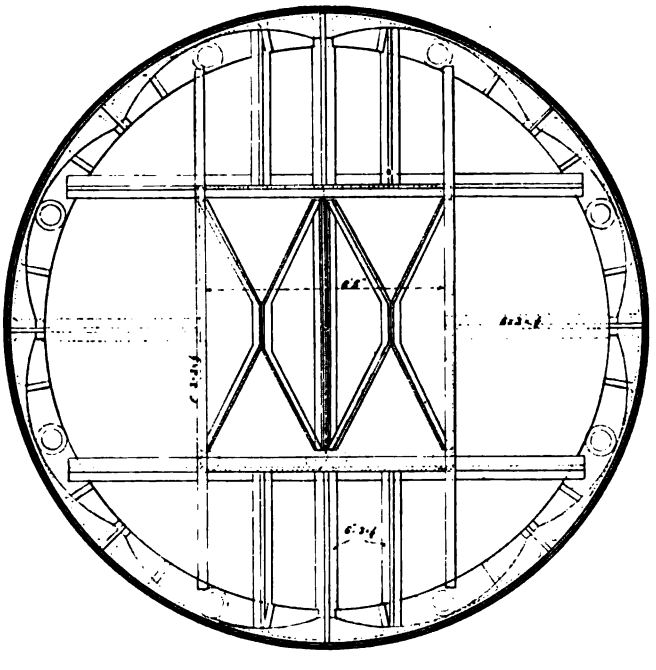


Fig. 147. — Premier bouclier. — Elévation arrière.

de 7 pouces (0,18 m.) de diamètre et 2 pieds (0,61 m.) de course. Ces vérins étaient boulonnés à l'enveloppe et s'appuyaient d'une part contre un anneau en fonte placé immédiatement derrière le diaphragme et d'autre part contre le revêtement par de larges patins (fig. 154 et 155.)

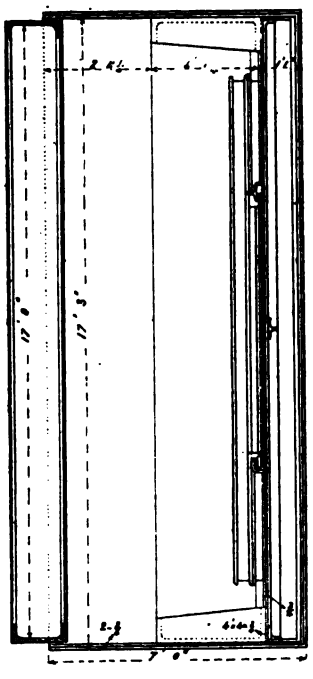


Fig. 148. — Premier bouclier. Coupe longitudinale.

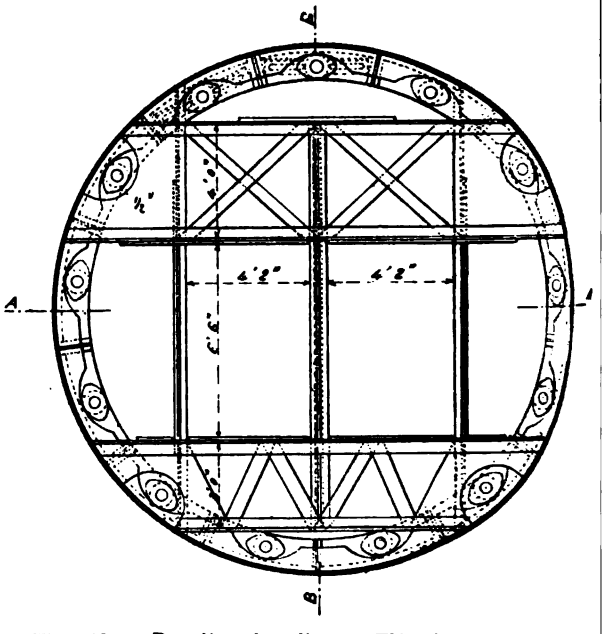


Fig. 149. — Deuxième bouclier. — Elévation arrière.

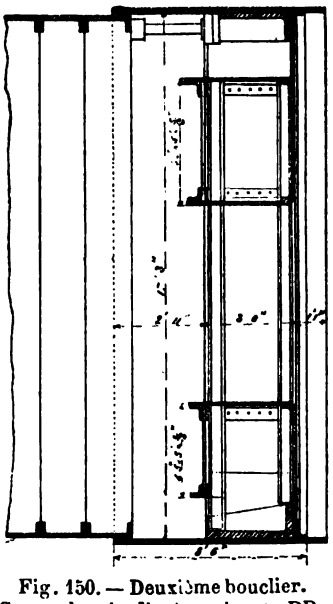


Fig. 150. — Deuxième bouclier. Coupe longitudinale suivant BB.

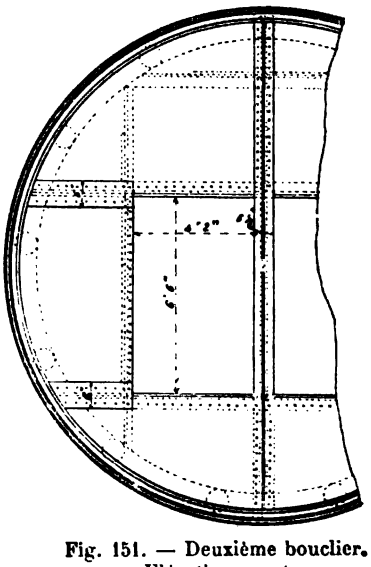


Fig. 151. — Deuxième bouclier. Elévation avant.

L'installation, fournie par MM. Markham and C°, de Chester-

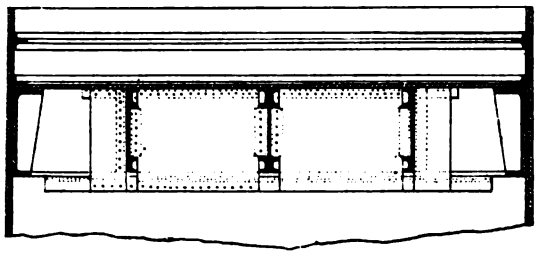


Fig. 152. — Deuxième bouclier. — Coupe horizontale suivant AA.

field, comprenait enfin une bouteille pour l'injection de ciment

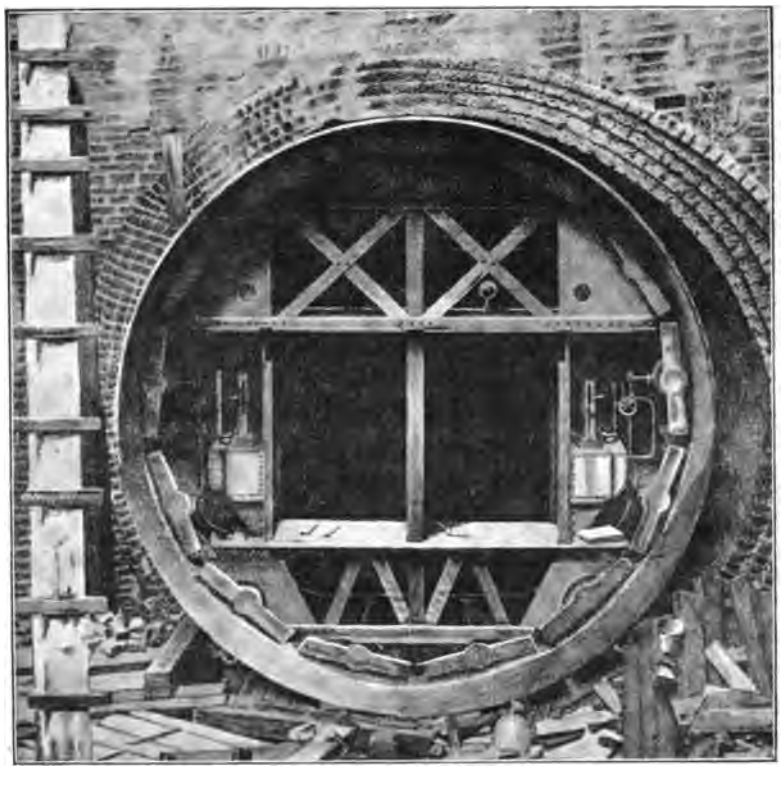


Fig. 153. — Deuxième bouclier. — Vue arrière pendant le montage.

de 2 pieds 6 pouces (0,76 m.) de longueur et 18 pouces (0,457 m.)

de diamètre. L'injection se faisait avec un tuyau muni d'une lance, sous une pression de 50 livres (3,5 kg.).

Marche du travail. — Le souterrain ouest se fit le premier dans d'excellentes conditions. On put en exécuter 60 pieds (18,29 m.) sans recourir à l'air comprimé, qui ne fut employé qu'à partir du 1 juin 1891, tout d'abord à la très faible pression de 10 livres (0,7 kg.) dans l'argile. En mai, on avait fait 12 yards (10,97 m.) à l'air libre, en juin à l'air comprimé on fit 14 yards (12,70 m.) et en juillet 17 yards (15,54 m.). En août l'argile commença à disparaître et on avança de 19 yards (17,37 m.). Enfin,

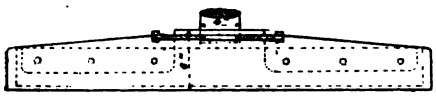


Fig. 154. — Elévation.

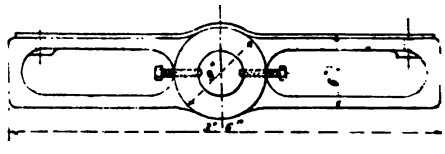


Fig. 155. — Coupe.

Deuxième bouclier. — Sabots d'appui des vérins.

dans la dernière partie qui se fit entièrement dans le sable avec une pression de 20 livres (1,4 kg.), l'avancement mensuel moyen fut de 20 yards (18,29 m.). Dans le sable la pression varia beaucoup ; au début, elle était de 18 livres (1,3 kg.), elle atteignit son maximum au milieu du lit, où le sable resta toujours mouillé, et descendit à 2 livres 1/2 (0,2 kg.) en arrivant au puits nord. Cette pression était bien inférieure à celle de l'eau qui variait de 60 à 50 pieds (18 à 15 m.), suivant la marée. Pour régler la pression suivant les besoins, le tuyau d'alimentation était muni d'un robinet de détente. On eut recours, pour maintenir les sables, à des boisages et à des étais comme à Londres (fig. 156).

Le souterrain de l'est fut, comme le premier, ouvert dans l'argile quand le souterrain de l'ouest fut arrivé tout près du puits. Mais dès que l'on eut atteint le sable, on perdit beaucoup d'air; il fallut d'abord ajouter un second compresseur, puis mettre les deux machines sur cette galerie et abandonner momentanément le souterrain de l'ouest. En février 1892, après l'achèvement du sas, au moment où l'on était prêt à mettre la pression, la couche d'argile trop mince céda et le sable et l'eau envahirent la galerie.

C'était un samedi soir, le sas était fermé et il n'y avait personne sur le chantier. On vint facilement à bout de cet accident en vingt-quatre heures environ. Avec une pression de 15 livres (1 kg.) le souterrain fut mis à sec. Ce fut d'ailleurs le seul accident. Ce souterrain était achevé en novembre 1892 et on put reprendre la galerie ouest qui fut percée en février 1893.

La galerie centrale pour piétons fut menée encore plus rapidement. La vitesse atteignit au milieu de la rivière 25 et 30 yards (23 à 27 m.) par mois. Il était terminé en novembre 1893.

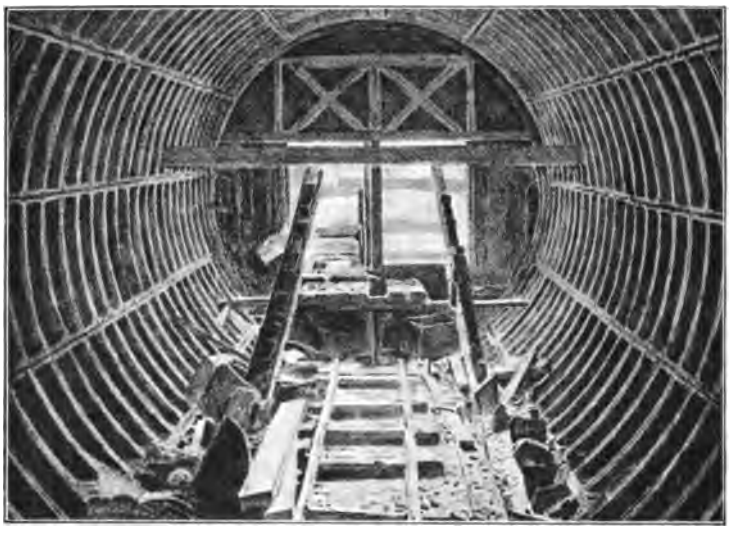


Fig. 156. — Vue de la galerie, du bouclier et des étais du boisage.

Les déblais étaient transportés dans de petits wagons et montés dans une cage que l'on voit à gauche de la figure 138. Au puits nord le revêtement en fonte fut raccordé avec celui de puits dont les segments avaient reçu une forme spéciale. Du côté du sud le raccordement se fit avec la maçonnerie de briques au moyen d'un joint en ciment.

La fouille à l'air comprimé n'est revenu qu'à 10 shillings par yard cubique (16,35 fr. par m^3), quoique les ouvriers fussent largement payés. Les mineurs recevaient 8 s. (10 fr.) par jour.

Tout ce que l'on peut dire de ce travail, c'est qu'il était relativement facile et qu'il a été heureux.

II

CHEMIN DE FER MÉTROPOLITAIN

(1892-1896)

Exposé. — Le Glasgow District Subway, chemin de fer métropolitain souterrain, dont la construction a été autorisée par le Parlement en 1890, est intéressant, non seulement parce qu'il constitue une des plus vastes installations de traction funiculaire, mais aussi en raison des procédés employés dans la construction,

La ligne de 6 milles 1/2 (10 461 m.) de longueur est circulaire et formée de deux souterrains à une voie accolés. Elle franchit deux fois la rivière la Clyde. Le projet en fut présenté deux fois au Parlement en 1887 et en 1888, mais il fut toujours repoussé jusqu'au jour où l'autorisation d'exécuter le souterrain du port en 1889 créa un précédent et permit aux ingénieurs de faire aboutir le projet. L'exécution en fut également confiée à MM Simpson et Wilson, qui avaient acquis une grande expérience des souterrains dans la construction d'une autre ligne de chemins de fer à Glasgow même.

Tracé. — La figure 157 donne une idée du tracé ainsi que des pentes et des courbes. La ligne part de Saint-Enoch Square, passe sous Buchanan Street à travers des sables mouillés, qui nécessitèrent l'emploi d'un revêtement en fonte et de l'air comprimé. A 1 819 pieds (554,42 m.) du point de départ, près du terminus du North British Railway se trouve la seconde des 15 stations à 40 pieds (12,19 m.) au-dessous du sol de la rue. La ligne tourne ensuite vers le nord-ouest, et passe sous Coweaddens, où l'on rencontra de très sérieuses difficultés. La profondeur variait de 25 (7,62 m.) à 72 pieds (21,94 m.) au-dessus de l'ouvrage ; sur 2 610 pieds (795,51 m.), on était dans des grès schisteux, mais à Coweaddens station le dessus du rocher s'abaissa au-dessous du sommet de l'ouvrage, et on dut, à grand peine, maintenir la circu-

lation, assurer le service d'un tramway qui passait au-dessus de la fouille et soutenir une grosse conduite d'eau de 42 pouces (1,07 m.) de diamètre. Sur le reste du parcours sous Coweaddens, New City Road, et Great Western Road jusqu'à Hillhead, le travail fut moins difficile ; le tracé était en alignement droit à travers des grès, des schistes, sauf un très petit parcours dans l'argile. En raison du relief du sol, la profondeur variait de 25 à 110 pieds (7,62 m.

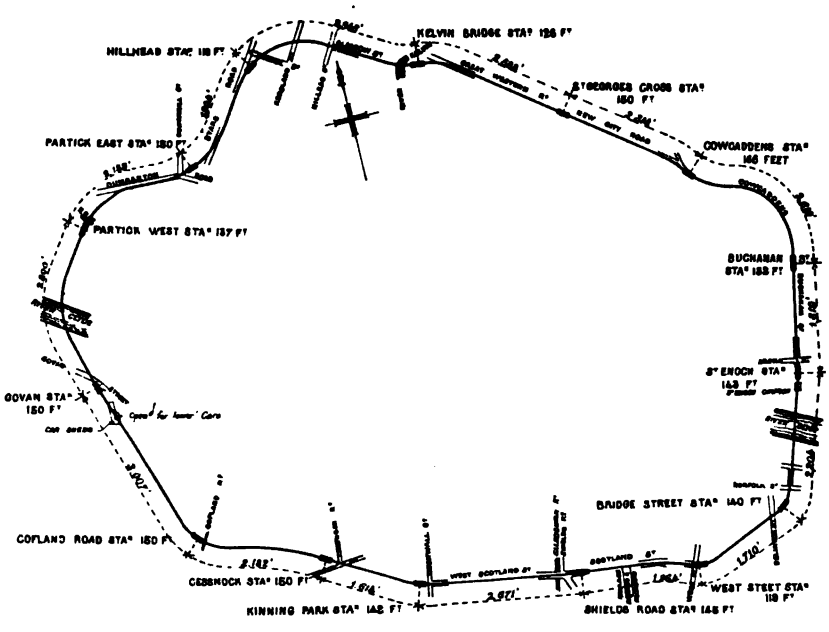


Fig. 157. — Plan.

à 33,52 m.). La traversée sous la rivière Kelvin se fit en terrain dur. A Hillhead on eut à passer à travers de vieilles mines de charbon et une carrière abandonnée où l'on trouva beaucoup d'eau. Le trajet sous Byars Road, dans Hillhead et à travers Partick n'offrit aucune difficulté.

Il en fut de même du passage sous la Clyde, à une profondeur de 56 pieds (17,06 m.) au-dessous des hautes eaux, toujours mesurée du sommet de l'ouvrage. La longueur de cette traversée est de 2800 pieds (853,42 m.) ; du côté Partick elle se fit dans de la vase, du rocher et de l'argile à galets ; du côté de Govan, où

trouva du sable. Ce terrain nécessita l'emploi de l'air comprimé à la pression de 30 livres (2,100 kg.).

A travers Govan, sur 5 190 pieds (1 581,88 m.), le sommet de la galerie n'est qu'à une profondeur variant de 8 (2,44 m.) à 13 pieds (3,96 m.) au-dessous de la surface. Le terrain se composant de boue, de sable et d'argile, il fallut prendre de grandes précautions pour sauvegarder les maisons riveraines. Entre Govan et Kinning Park, on put travailler en tranchée ; mais la ligne pénétra ensuite dans l'argile à briques à une profondeur de 13 (3,96 m.) à 27 pieds (8,23 m.) au-dessous de la surface, et on procéda à l'avancement en souterrain sans incident, quoique l'on croisât les rues les plus fréquentées de Glasgow.

La seconde traversée de la Clyde, à Saint-Enoch, dans le haut port, un peu à l'est de Glasgow Bridge, se fit à une profondeur de 41 pieds (12,50 m.) au-dessous des hautes eaux, dans des sables boulants et de la vase.

Dispositions principales des ouvrages. — Le souterrain se

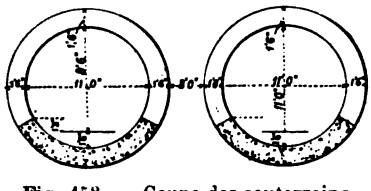


Fig. 158. — Coupe des souterrains en maçonnerie.

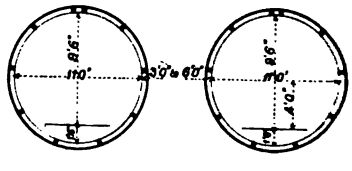


Fig. 159. — Coupe des souterrains avec revêtement en fonte.

compose de deux galeries de 11 pieds (3,35 m.) de diamètre intérieur espacées de 3 (0,91 m.) à 6 pieds (1,83 m.). Le revêtement est en fonte ou en briques et béton (fig. 158 et 159).

On a ménagé dans le massif intermédiaire des trous de 3 pieds (0,91 m.) de largeur sur 5 pieds (1,52 m.) de hauteur tous les 25 yards (22,86 m.) partout où le terrain l'a permis et à 10 pieds (3,05 m.) d'intervalle des drains de 4 pouces (0,10 m.) pour l'écoulement des eaux qui pourraient s'accumuler sur les flancs des voûtes. Les voûtes sont exécutées en béton composé de 4 parties de pierre cassée pour 1 de ciment ; dans les flancs, on a réduit le dosage à 5 pour 1 et dans le radier à 6 pour 1. Les stations au

nombre de 15 ont 28 pieds (8,53 m.) de largeur. Les deux voies encadrent un quai central de 10 pieds (3,05 m.) de largeur, élevé de 2 pieds 2 pouces (0,66 m.) au-dessus des rails. Elles sont en général à 20 pieds (6,10 m.) en contre-bas de la rue, et quand elles sont voûtées, leur hauteur est d'environ 16 pieds (4,87 m.) au-dessus des rails. Elles ont reçu un revêtement en briques.

Les courbes ont en général de grands rayons ; le plus petit est

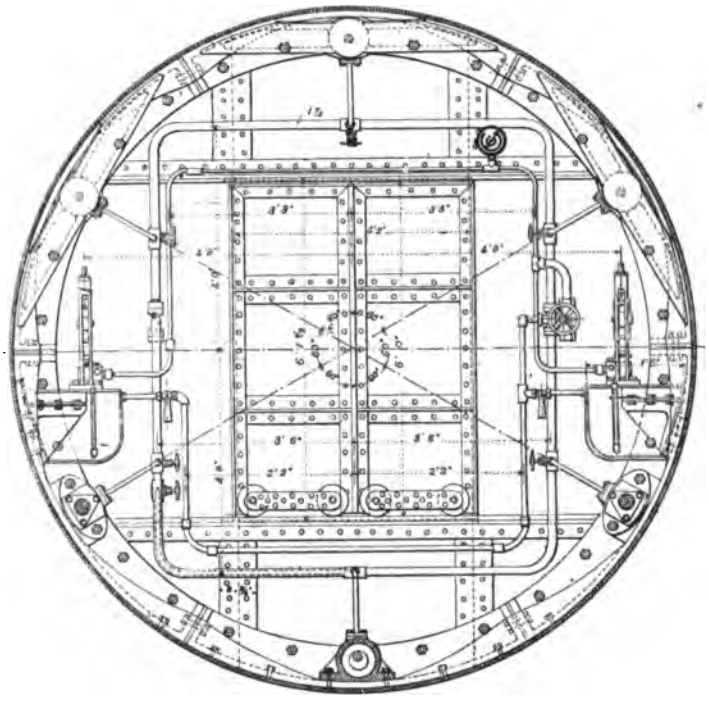


Fig. 160. — Vue arrière du bouclier.

encore de 660 pieds (201,16 m.). Les pentes les plus fortes sont des pentes de 1/20 à la rivière et de 1/75 à Buchanan Street. En général, les stations sont abordées en rampe, afin de faciliter l'arrêt, et, dans le but d'activer le démarrage, le départ a lieu sur une pente.

Les boucliers. — On a eu recours à l'emploi de l'air comprimé sur une longueur de 2 milles (3 219 m.) environ sous la rivière, sous Buchanan Street, sur une courte longueur à Govan et à Partick et

sous Shields Road où la ligne croisait de nombreuses voies desservant le port et passait près des constructions.

Les boucliers (fig. 160 à 162) furent construits par Markham à Chesterfield; on en employa 16, mais plusieurs furent retirés après avoir été mis en route, en raison de la bonne nature du sol. Ils avaient 12 pieds 6 pouces (3,81 m.) de diamètre intérieur et 6 pieds 6 pouces

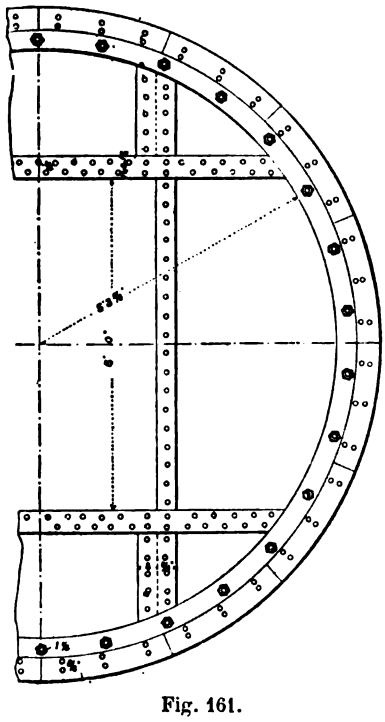


Fig. 161.
Vue avant du bouclier.

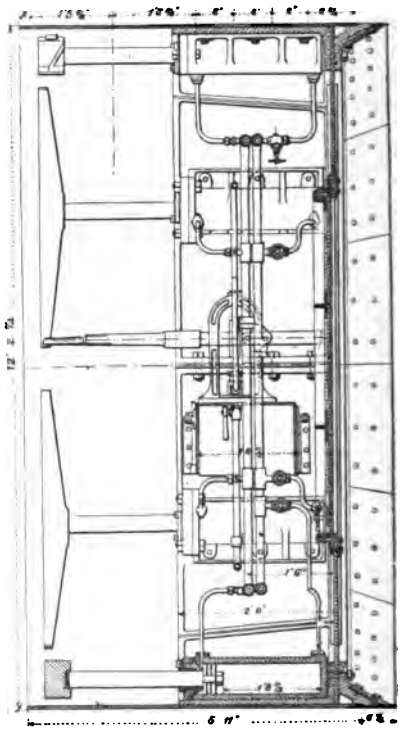


Fig. 162.
Coupe longitudinale du bouclier.

(1,98 m.) de longueur. L'enveloppe se composait de deux épaisseurs de tôle d'acier de 1/4 de pouce (0,006 m.) et l'arête coupante était à 1 pied (0,305 m.) en avant de la cloison. Ils étaient munis de 6 vérins pouvant supporter une pression de 2 200 livres par pouce carré (155 kg.), mais il suffit en général de 800 livres (56 kg.). Ces boucliers pesaient chacun 6 t. (6 099 kg.).

La descente de ces boucliers à Saint-Enoch présenta quelques particularités intéressantes. On commença par battre une enceinte

de pieux et on descendit un puits. On trouva à 15 pieds (4,56 m.) du sable très fin et très mouillé. On fit alors une voûte en béton et on déblaya en dessous. On mit sept mois à faire cette fouille et à placer le radier en béton. On put alors monter 4 boucliers, deux pour marcher côte à côte sous Buchanan Street et deux pour se diriger au sud sous la rivière. Après qu'ils furent avancés de 12 pieds, on put construire les écluses et travailler à l'air comprimé. Ces opérations donnèrent lieu aux plus grandes difficultés.

Usine de compression. — L'usine de Saint-Enoch était installée au niveau de la rue dans un bâtiment en briques couvert en tôle galvanisée. Cette usine, qui dut être augmentée en cours de travail, contenait deux compresseurs doubles. L'un, de la Anderston Foundry C°, avait des cylindres à vapeur de 24 pouces (0,61 m.) de diamètre et des cylindres à air de 30 pouces (0,76 m.) de diamètre, avec une course commune de 24 pouces (0,61 m.), donnant 75 coups à la minute. L'admission aux cylindres à air se faisait par des tiroirs et il n'y avait pas d'enveloppe refroidie par l'eau. L'autre était une machine Slee; les cylindres à vapeur avaient 24 pouces (0,61 m.) de diamètre et les cylindres à air 26 pouces (0,66 m.), la course était de 3 pieds (0,91 m.) et le nombre de coups de 60 à la minute; l'admission se faisait par des soupapes à clapet et l'enveloppe était refroidie avec de l'eau. La vapeur était fournie sous la pression de 80 livres (5,6 kg.) par trois chaudières Lancashire de 26 × 7 pieds (7,92 m. × 2,13 m.), munies de distributeurs Vicar et d'appareils fumivores. L'air comprimé à 25 livres (1,7 kg.) était envoyé dans deux réservoirs de 24 × 5 pieds (7,21 × 1,52 m.) refroidis par un courant d'eau et était distribué dans chacune des quatre galeries par des tuyaux de 9 pouces (0,23 m.) munis de robinets détendeurs.

Chacune des machines Slee pouvait alimenter deux des quatre galeries au début; mais quand une des galeries sous la Clyde fut arrivée à 186 pieds (56,69 m.), elles devinrent insuffisantes et l'on dut installer les machines Anderston. Quand on eut parcouru 900 pieds (274,32 m.) sous Buchanan Street et 370 pieds (112,77 m.) sous la Clyde, les machines ne purent suffire à l'alimentation et on

dut suspendre l'avancement sous la Clyde jusqu'à l'achèvement de l'autre côté.

Les sas à air (fig. 163 à 165) étaient insérés dans des murs en

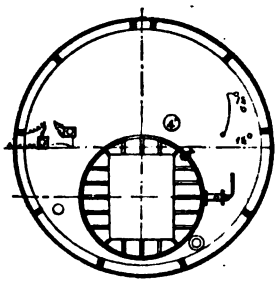


Fig. 163.
Elévation du sas à air.

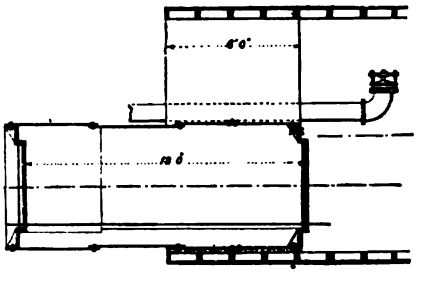


Fig. 164.
Coupe longitudinale du sas à air.

briques et ciment de 6 pieds (1,83 m.) d'épaisseur. Leur longueur était de 13 pieds 9 pouces (4,19 m.) et leur diamètre de 5 pieds 9 pouces (1,75 m.); la figure 163 donne l'indication de toute la tuyauterie qui accompagnait les sas.

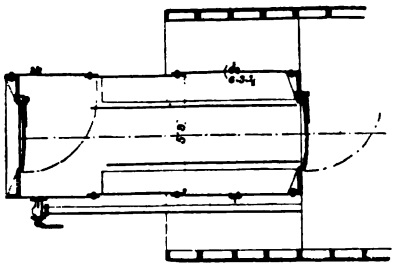


Fig. 165.
Coupe horizontale du sas à air.

L'installation complète avec la grue d'extraction, les machines soufflantes, les pompes d'épuisement, les bennes, etc., a coûté 7 500 livres sterlings (187 500 fr.) pour 4 023 pieds (1 226,18 m.) de double galerie.

Exécution du travail. — La forme du couteau, l'absence de divisions au front d'attaque et le peu de distance entre la cloison et le couteau se prêtaient mal au travail dans du sablefin. Comme au City and South London, il fallut recourir à un boisage compliqué (fig. 166 à 169) à l'avant du bouclier, dans la traversée de Buchanan Street et sous la Clyde. On exécutait une petite galerie boisée à 9 pieds (2,74 m.) en avant du bouclier et on boisait avec des planches de 3 pouces (0,076 m.), en faisant une injection soignée pour éviter les pertes d'air. Cette disposition est très critiquable, car elle annihile une grande partie des avantages du bouclier et

les étais de butée empêchent de fermer les portes en cas d'accident. Le bouclier ne donnait donc qu'une sécurité trompeuse.

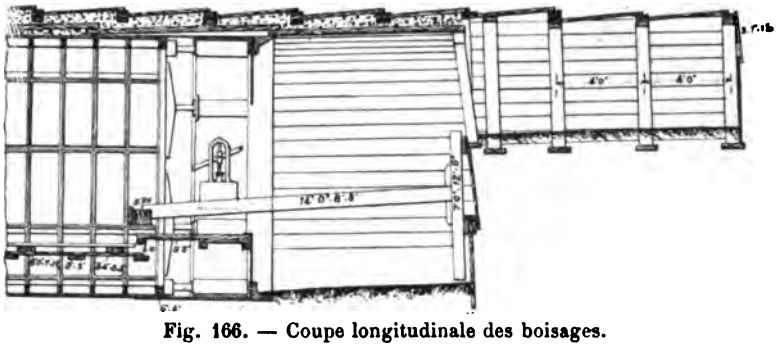


Fig. 166. — Coupe longitudinale des boisages.

Cette manière d'opérer était d'autant plus dangereuse qu'en

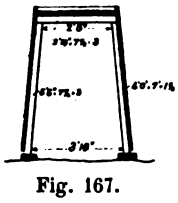


Fig. 167.
Coupe de la petite galerie.

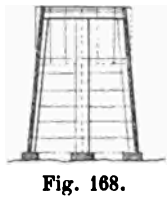


Fig. 168.
Front d'attaque de la petite galerie.

raison de la hauteur de 12 pieds 3 pouces (3,73 m.) de la galerie, il y avait dans le haut un excès de pression de 825 livres par pied carré (0,370 kg. par cm²); si l'on ajoute que, par suite du jeu de la marée, la hauteur d'eau se réduisait de 11 pieds (3,35 m.), ce qui correspond à une pression de 5 livres 1/4 (0,33 kg.), on voit que, si l'on maintenait la pression, la pression de l'air surpassait celle de l'eau de 0,7 kg. et pouvait soulever une couche de terre de 21 pieds (6,40), alors que l'on ne disposait que de 14 pieds (4,27 m.). On ne pouvait, par suite de circonstances locales, songer à garnir le fond de la rivière d'argile. Aussi en cinq mois, sur un parcours de 80 pieds (24,38 m.) fit-on sauter dix fois le lit de la rivière. En février

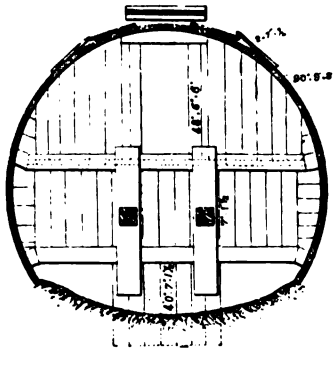


Fig. 169.
Boisages du front d'attaque.

1894, les boisages furent eux-mêmes enlevés et il se forma une cheminée de 24 pieds (7,22 m.) de côté et 16 pieds (4,87 m.) de profondeur.

Les entrepreneurs se retirèrent et furent remplacés par M. G. Talbot. Ce dernier allongea encore les boisages jusqu'à 18 pieds (5,49 m,) en avant du bouclier et essaya d'éviter les pertes d'air en intercalant une feuille de tôle derrière les boisages. Il ne réussit en réalité que parce que la pression fut réglée avec le soin le plus minutieux; il employa trois équipes par vingt-quatre heures au

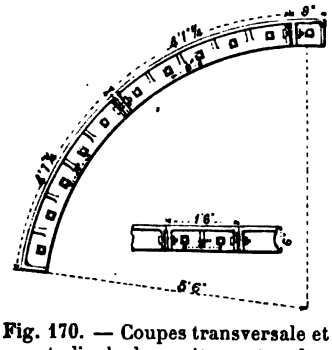


Fig. 170. — Coupes transversale et longitudinale du revêtement en fonte.

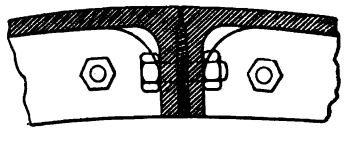


Fig. 171. Détails d'un joint.

lieu de deux et obtint ainsi un avancement mensuel de 100 pieds (30,48 m.) sous la Clyde et de 124 pieds (37,79 m.) sous Buchanan Street.

A Govan, la pression atteignit près de 2 kg., mais on avait au-dessus de la voûte une couche de terre de protection de 57 pieds (17,37 m.) et on travaillait dans la vase au lieu de sable. Aussi le travail ne donna-t-il lieu à aucun accident.

On employa également l'air comprimé, mais sans bouclier ni enveloppe métallique dans deux cas où l'on travaillait à une profondeur de 2 pieds 6 pouces (0,76 m.) au-dessous de la rue; mais on avait soin d'exécuter préalablement la voûte en béton dans une tranchée.

Revêtement en fonte. — Le revêtement en fonte est représenté sur les figures 170 et 171. Il n'a de remarquable que la disposition adoptée pour les joints horizontaux. Ces derniers compor-

tent à l'extrados une portée de 3/10 pouce (0,008 m.) et sont garnis avec une fourrure en bois tendre sur 6 pouces (0,15 m.). A l'intérieur, on calfatait les joints avec des coins en chêne. Ce système assurait une grande étanchéité et ne coûtait que 1 sh. 6 d. (1,85 fr.) à l'air comprimé et 1 sh. (1,25 fr.) à l'air libre, au lieu de 2 shil. 2 d. (2,70 fr.) qu'il eût fallu dépenser pour faire un joint au ciment. Mais il a le grand défaut de faire travailler les nervures d'une manière excessive et d'exposer à des ruptures.

Résumé. — En résumé, ce travail certainement intéressant ne paraît pas avoir toujours été mené d'une façon très rationnelle, et on est en droit de critiquer les dispositions du bouclier et du revêtement en fonte.

CHAPITRE VIII

COMPAGNIE DE GAZ A NEW-YORK

SOUTERRAIN SOUS LA RIVIÈRE DE L'EST

(1892-1894)

Exposé. — En 1892, la East River Gaz C° de Long Island City obtint l'autorisation de livrer du gaz à New-York. Cette compagnie résolut d'installer une usine à Ravenswood dans un terrain de 12 acres (45 hectares) qui borde la rivière de l'Est sur 800 pieds (244 m.). L'usine complète devait pouvoir produire 50 000 000 pieds cubes (1 400 000 m³) par jour. En septembre 1893, une des sections de cette usine d'une production de 6 000 000 pieds cubes (170 000 m³) était prête à fonctionner.

Pour livrer le gaz aux habitants de New-York, il fallait faire franchir la rivière à trois conduites, deux de 36 pouces (0,91 m.) et une de 48 pouces (1,22 m.) On résolut de placer ces conduites, pour le passage de 2 200 pieds (670,55 m.) sous la rivière, dans une galerie souterraine.

Cette galerie fut prévue en ligne droite (fig. 172); elle devait partir de l'usine de Ravenswood entre Hunter's point et Astania et aboutir à la East 71e rue à New-York; dans le parcours elle devait traverser l'île de Blakwell; sa longueur de puits à puits devait être de 2 516 pieds (766,86 m.), avec une légère pente de 12 pieds (3,66 m.) vers le puits Est. Son radier était prévu à 125 pieds (38,10 m.) au-dessous des basses eaux et son sommet au minimum à 41 pieds (12,50 m.) du fond du lit de la rivière.

Études préliminaires.— L'emplacement du souterrain, des puits et leur distance furent déterminés avec le plus grand soin en les rattachant par une triangulation à une base soigneusement mesurée. Mais la détermination de l'alignement fut très laborieuse; car la rivière a une profondeur de 30 à 65 pieds (9,14 m. à 19,81 m.) et le courant une vitesse de 8 à 10 milles à l'heure (3,57 m. à 4,47 m. par seconde). Des sondages au nombre de 20 de 2 pouces (0,05 m.) de diamètre purent néanmoins être faits sur la ligne du souterrain. On se servit pour cela d'un burin hydraulique vissé à des tuyaux de 2 pouces dont les manchons ne faisaient aucune saillie. L'eau sous pression entrait dans la tarière (fig. 173) par un trou axial d'un 1/2 pouce (0,0127 m.) et ressortait par des trous latéraux, de manière à chasser les débris du forage et à faciliter la descente. On ne pouvait travailler que vingt à trente minutes consécutives, pendant l'étale entre deux marées ; aussi, pour ne pas perdre de temps, on vissait à l'avance 60 pieds (18,29 m.) de tuyaux que l'on maintenait avec une sonnette. Il y eut quelques accidents; des ruptures de tuyaux obligèrent à abandonner quelques trous; néanmoins on reconnut que le terrain se composait de roche dure, surmontée de 2 à 3 pieds (0,61 m. à 0,91 m.) de gravier dans le bras de l'Est, et de quelques pouces seulement dans le bras de l'Ouest. On n'eut d'ailleurs nulle part le temps de pénétrer dans la roche. Comme, d'autre part, on trouvait sur les deux rives et dans l'île de Blakwell, du granit bâtard à grains serrés, on crut pouvoir en conclure que le souterrain pourrait s'exécuter sur

Fig. 172. — Plan général.

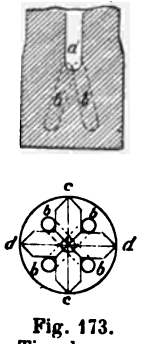


Fig. 173. Tige de sondage.

toute sa longueur dans la roche dure, et c'est sur cette base que l'on traita avec les entrepreneurs, MM. Langhlen et Reilley.

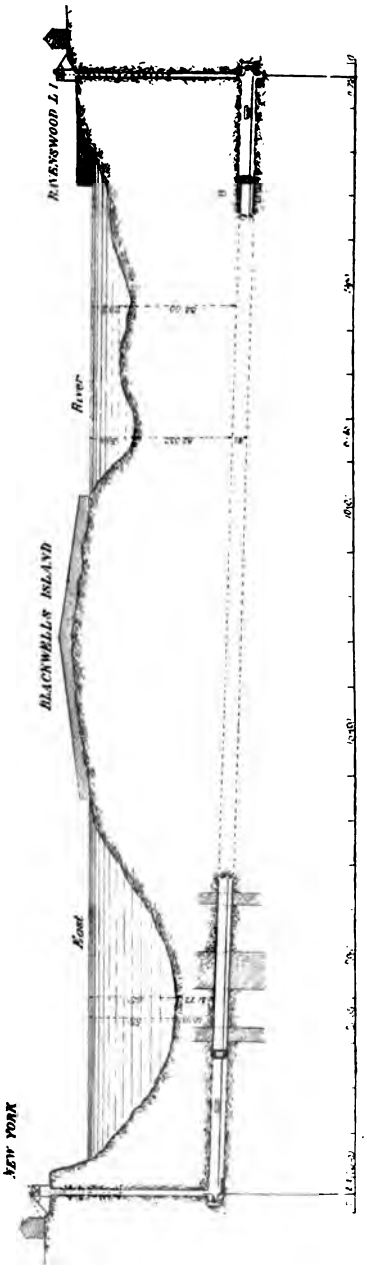


Fig. 174. — Profil en long.

Dispositions générales des ouvrages. — La figure 174 donne la coupe de la rivière et le profil du souterrain. Les puits étaient carrés et avaient 9 pieds (2,74 m.) de côté. Le souterrain (fig. 175) devait avoir 8 pieds 6 pouces (2,59 m.) de hauteur et 10 pieds (3,05 m.) de largeur; le sommet et les angles devaient être arrondis et le sol revêtu d'un radier en béton. Sur les flancs et à la voûte le rocher devait rester apparent et brut, sous la seule condition de laisser entièrement libre le gabarit indiqué en traits ponctués.

Les figures 176 à 178 donnent les coupes du souterrain dans la roche dure et la roche tendre et montrent la situation que doivent occuper les trois conduites. Ces conduites devaient être primitivement en tôle; mais on décida de les faire en fonte, de manière qu'elles fussent assez lourdes pour ne pas être soulevées, si l'eau venait à envahir la galerie après son achèvement. On espérait éviter ainsi les frais d'un épuisement permanent et pouvoir se contenter de mettre à sec en cas de visite ou de réparation.

Fonçage des puits et attaque des galeries. — On implanta les puits en mai 1892; le puits de

Ravenswood fut attaqué le 28 juin à 200 pieds (60,96 m.) de la rive et descendu à 148 pieds (45,11 m.). La descente se fit dans la roche dure, mais on eut à y faire des épuisements assez considérables. Le puits de New-York fut attaqué, le 7 juillet, dans une

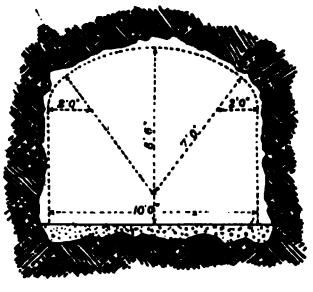


Fig. 175.
Profil type.

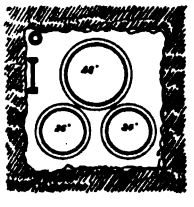


Fig. 176.
Coupe dans la roche dure.

propriété, située à l'angle de la 71e avenue et du quai de la rivière de l'Est et descendu à 139 pieds (42,37 m.); le rocher y était tout à fait sec.

On attaqua aussitôt les galeries; en raison de la faible section on ne pouvait pas mettre plus de dix hommes à la fois, mais le travail

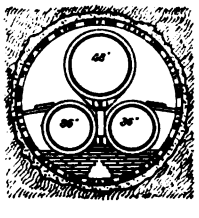


Fig. 177. — Coupe en terrain tendre avec revêtement métallique.

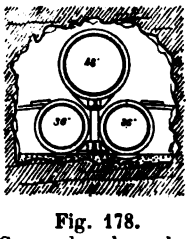


Fig. 178.
Coupe dans la roche.

avait lieu sans interruption avec deux équipes travaillant onze heures chacune. Du côté de l'Ouest ou de New-York, le rocher était à sec et on avança facilement sans boisage. Du côté de l'Est ou de Long-Island, on fut un peu gêné par une grande quantité d'eau salée. On arriva ainsi en fin décembre 1892 à 338 pieds (103,02 m.) dans la galerie Ouest et à 285 pieds (86,87 m.) dans la galerie Est (fig. 179).

Rencontre du terrain tendre. — Le 25 décembre, on rencontra, dans la galerie de New-York, une fissure fournissant un jet d'eau de 3 pieds. Le rocher en ce point était du gneiss dur, stratifié avec une inclinaison de 10° sur la verticale, vers Long-Island et une direction Nord-Sud perpendiculaire au tracé. La roche s'amollissait graduellement, devenait de plus en plus micacée, lorsque à 20 pieds (6,09 m.) de la fissure elle fit brusquement place à une veine de terrain tendre offrant les mêmes conditions de stratification.

Cette veine se composait de feldspath pourri, de couleur grise, s'effritant facilement; elle conservait encore l'aspect rocheux et

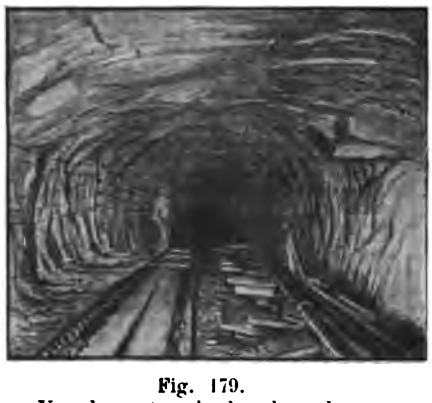


Fig. 179.
Vue du souterrain dans le rocher.

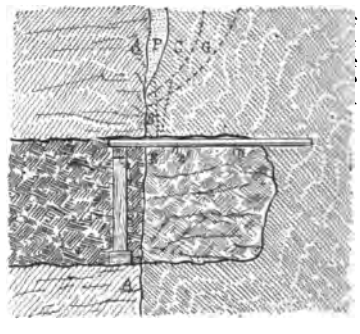


Fig. 180.
Galerie de recherche.

paraissait sèche tant que l'on ne l'attaquait pas; mais dès qu'on y touchait, elle subissait l'action de l'eau qui l'affouillait. Cette veine tendre était en effet accompagnée d'une veine aquifère, particulièrement abondante à la surface de séparation de la roche dure et de la roche tendre. L'expérience montra qu'il en était toujours ainsi. S'il n'y avait pas eu d'eau, on aurait certainement pu traverser cette veine tendre sans air comprimé, quoique cela n'eût pas été bien prudent. Avant de prendre une décision, on essaya de faire une petite galerie de recherche de 4 pieds (1,22 m.) de largeur et 5 pieds (1,52 m.) de hauteur, afin de reconnaître le terrain et de déterminer l'épaisseur de la veine tendre. On construisait cette galerie par longueur de 6 pieds (fig. 180), en employant comme blindage de protection au ciel des tuyaux de 2 pouces (0,05 m.) que l'on poussait en avant horizontalement. Mais le terrain s'amol-

lissait rapidement. Il devait y avoir primitivement une petite poche ou fissure P, pleine d'eau, au point de séparation des deux natures de terrain. Quand la fouille fut faite en E, le terrain se trouva assez aminci pour céder sous la pression de l'eau qui s'ouvrit un chenal B et coula dans le souterrain. Au bout d'un certain temps, un fragment de rocher C se détachait et des débris venaient obstruer le canal B, en laissant une poche P plus grande qui se remplissait de nouveau d'eau. Quand elle avait acquis une pression suffisante, elle rouvrait le canal B; mais les parois ramollies par l'eau s'éboulaient et un morceau G, en se détachant, venait à nouveau obstruer l'issue et agrandissait la poche. Ce travail était accompagné d'un bouillonnement dû au déplacement de l'air et de l'eau dans la cavité. Ces écoulements, remplissages et affouillements successifs continuèrent en agrandissant la poche. Le bruit du bouillonnement devint de plus en plus alarmant, et on commença à craindre que la poche s'agrandît au point d'établir une communication avec la rivière. A chaque irruption d'eau, les ouvriers se sauvaient en courant, persuadés que c'était la rivière qui envahissait la galerie.

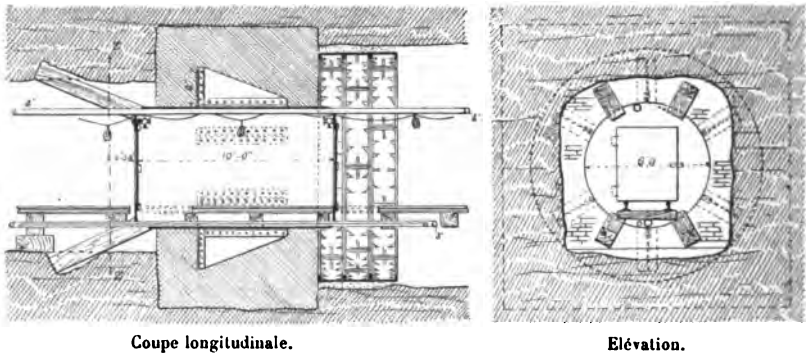
Le 3 décembre, on se décida à arrêter et à murer la galerie. Les éboulements avaient à ce moment produit un cube de 25 yards cubiques (19 m³) et, comme on n'était qu'à 45 pieds (13,72 m.) du fond de la rivière, ce n'était pas sans motif que l'on craignait que la communication s'établît. La cloison provisoire fut bien bourrée de foin pour éviter que le mal s'aggravât, et on discuta le procédé à adopter.

Les entrepreneurs étaient d'avis d'abandonner la galerie et de repartir à nouveau du puits à un niveau inférieur, dans l'espoir que le terrain y serait meilleur. Ce procédé avait réussi au Croton aqueduct à la traversée de la rivière Harlem, où l'on avait dû, après deux ou trois essais malheureux pour traverser le terrain tendre, se reporter 150 pieds (45,71 m.) plus bas dans le rocher. Mais ici il s'agissait d'une veine et rien ne prouvait qu'elle ne se continuait pas plus bas; dans ce cas, on aurait eu à lutter contre une pression d'eau beaucoup plus forte qu'au niveau actuel. Aussi les ingénieurs s'opposèrent-ils au projet des entrepreneurs; il leur parut préférable d'essayer d'abord l'emploi de l'air comprimé et de

ne recourir au rejet de la galerie à un niveau inférieur, qu'en cas d'échec, comme dernière ressource.

Premier travail à l'air comprimé. — *Galerie Ouest.* — Un prix nouveau fut fait avec les entrepreneurs pour la traversée de ce terrain.

On installa tout d'abord un sas à air, à 40 pieds (12,19 m.) en arrière du front de taille, un peu avant le commencement de la roche tendre. On refouilla les parois de la roche sur 8 pieds (2,44 m.) de longueur, de manière à porter le diamètre de la galerie à 15 pieds (4,57 m.). Cette fouille fut remplie par un mur en maçonnerie de briques et ciment, dans lequel fut scellé un cylindre de 6 pieds (1,83 m.) de diamètre et 10 pieds (3,05 m.) de longueur



Coupe longitudinale. Elévation.

Fig. 181. — Sas à air.

(fig. 181), formé de tôle d'acier rivées de 3/4 de pouce (0,019 m.) d'épaisseur, avec des bouts convexes en acier, munis de porte de 3 pieds 2 pouces (0,96 m.) sur 3 pieds 8 pouces (1,11 m) s'ouvrant contre la pression. Pour combattre l'effet de la poussée horizontale sur les bouts du cylindre, qui tendaient à le faire sortir de la maçonnerie, on riva sur les côtés du cylindre des goussets de 6 pouces (0,15 m.) de largeur et 2 pieds (0,61 m.) de longueur, formés de tôle et fers cornière, et situés dans un plan parallèle à l'axe. Ces saillies étaient enchâssées avec soin dans la maçonnerie de briques, de manière à bien répartir la pression. L'écluse fut munie de robinets de 1 pouce 1/4 (0,03 m.) pour l'admission et l'échappement de l'air et d'un tuyau hydraulique passant dans des boîtes à étoupe.

Dans l'installation de surface, on dut ajouter au compresseur Ingersoll déjà employé pour conduire les perforatrices un petit compresseur Rand. On introduisit l'éclairage électrique à peu près indispensable avec l'air comprimé, en raison de la fumée intense que donnent dans ce milieu les illuminants ordinaires; on installa enfin un téléphone reliant la chambre de travail à la salle des machines, afin d'aviser rapidement dans le cas où il deviendrait subitement nécessaire d'élever la pression.

Fig. 182.
Pose du blindage métallique.

Le travail fut repris dans la galerie le 25 février 1893 sous une pression de 35 livres (2,460 kg.) qu'il fallut bientôt élever à 42 livres (3 kg.)

On employa, pour la traversée de ce mauvais terrain, à la voûte, un blindage composé de tôle d'acier de 3 pieds (0,91 m.) de longueur, 1 pied (0,30 m.) de largeur et 1/8 de pouce (0,003 m.) d'épaisseur garnies sur les bords de cornières rivées de 2 pouces 1/2 × 2 pouces 1/2 × 1/4 pouce (0,06 × 0,06 × 0,006). Ces plaques étaient mises en place et boulonnées dans une galerie de 6 pieds (1,83 m.) de hauteur. On employait des planches de blindage provisoire (fig. 182) jusqu'à la pose des plaques et on blindait le front de taille. Quand on eut fait environ 20 pieds (6,10 m.), on porta ce faux toit (fig. 183 et 184) avec des étais appuyés sur une semelle horizontale de 12 pouces × 12 pouces (0,30 m. × 0,30 m.) placée dans l'axe du souterrain. Ces étais avaient 6 pouces (0,15 m.) sur 6 pouces (0,15 m.) et étaient au nombre de 8 en éventail. Chaque série était espacée de 4 pieds (1,22 m.). Ce boisage empêchait naturellement de rouler les déblais que l'on devait reprendre à la pelle.

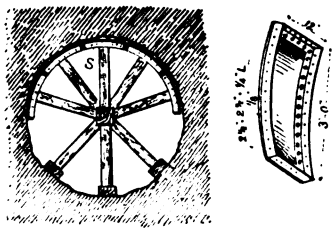


Fig. 183. — Coupe de la galerie et vue du blindage métallique.

A 10 pieds (3,05 m.) en arrière, on reprenait la fouille, en la

descendant d'abord sur les côtés et en respectant la semelle. On la réglait ensuite et on exécutait (fig. 185) une maçonnerie circulaire de 4 rangées de briques d'épaisseur et de 10 pieds (3,05 m.) de diamètre intérieur. La voûte se construisait sur des couchis posés sur des cintres en fer à T, portés sur des étais radiaux. Ces cintres avaient une section de 4 × 6 × 3/8 pouce (0,10 m. × 0,15 m. × 0,01 m.), ils descendaient jusqu'à 6 pouces (0,15 m.) en contre-bas des naissances et se composaient de deux pièces réunies à la clef par deux plaques de 3/8 pouce (0,009 m.) d'épaisseur et 6 boulons. Les étais qui portaient les cintres avaient 6 × 6 pouces (0,15 m. × 0,15 m.) et les couchis 2 pouces (0,05 m.) d'épaisseur,

Fig. 184.
Attaque à section complète.

Fig. 185.
Exécution de la voûte en maçonnerie.

4 pouces (0,10 m.) de largeur et 9 pieds (2,74 m.) de long^e^. La maçonnerie s'exécutait par anneaux de 10 à 12 pieds (3,05 m. à 3,66 m.).

Pendant l'exécution de ce travail, on éprouva beaucoup de difficultés, il fallut parfois élever la pression à 48 livres (3,375 kg.); on perdait d'ailleurs beaucoup d'air, qui s'échappait à travers le terrain, et faisait bouillonner la rivière. La boue qui s'écoulait était grasse et visqueuse, de la consistance d'une « soupe », disaient les ouvriers. Ce ne fut que le 8 avril que le dernier anneau de maçonnerie de briques en terrain tendre fut posé, après avoir traversé 29 pieds (8,84 m.) de terrain décomposé. On avait eu à traverser d'abord 9 pieds (2,74 m.) de feldspath gris décomposé, une veine de 4 pouces (0,10 m.) de quartz dur, 6 pieds (1,83 m.)

de feldspath pur blanc décomposé et enfin 14 pieds (4,27 m.) de feldspath et de chlorite floconneuse, vert foncé et grasse au toucher, qui coulait sous l'action de l'eau que l'on retrouva en abordant la roche dure.

Galerie Est. — Sur la rive de Long-Island, le travail se poursuivit sur 250 pieds (76,24 m.) dans un gneiss dur stratifié, contenant de grandes quantités d'eau salée avec du fer, de la chaux et de la magnésie. On trouva ensuite un lit de 4 pieds (1,22 m.) de terrain tendre chloriteux, complètement sec, qui fut traversé sans grandes difficultés avec des boisages. On en trouva plusieurs semblables jusqu'à 285 pieds (86,87 m.) où après avoir traversé 2 pieds (0,61 m.) de rocher dur, on atteignit une chlorite tendre verte, tout à fait liquide, qui commença à couler avec force par les trous de sonde.

Ces trous de sonde furent bouchés; mais on voulait connaître quel terrain on allait rencontrer. Comme on était à 100 pieds (30,48 m.) au-dessous de la rivière, on se risqua à essayer une galerie sans air comprimé. On commença par percer un certain nombre de trous, limitant une surface carrée de deux pieds (0,61 m.) de côté, jusqu'à la chlorite. Avant de faire sauter le bloc de rocher ainsi détaché, on prit la précaution de construire un mur à 40 pieds (12,20 m.) en arrière. Quand on eut mis le feu, il se produisit une irruption abondante, qui fut heureusement arrêtée par un bloc de rocher qui boucha le trou.

Après quelques essais désespérés, le travail fut abandonné à la fin de mars. Il y avait un jet d'eau de 4 pouces (0,10 m.) dans la galerie. On arrêta l'épuisement et on laissa le souterrain et le puits se remplir d'eau.

Emploi d'un revêtement en fonte. — Du côté New-York, quand on eut traversé la couche tendre, on continua à travailler à l'air comprimé dans un rocher, dont la composition était analogue et se composait de lits alternés de 1 pouce (0,025 m.) à 3/8 pouce (0,01 m.) de feldspath blanc, de chlorite verte et de veines de quartz. Ce rocher n'était pas pourri comme le précédent, mais il était encore très tendre, et, quoiqu'on dût y employer la mine, il

était souvent nécessaire d'exécuter un revêtement. Quand la galerie eut été percée sur 69 pieds (21,03 m.), la compagnie décida d'enlever la pression. Mais à peine l'eut-on fait, que la maçonnerie de briques dans la partie tendre se montra si défectueuse qu'il fallut rétablir l'air comprimé. On décida alors de la doubler avec un revêtement en fonte, et comme, pour loger les conduites, on ne pouvait réduire la section, on fixa à 10 pieds 2 pouces (3,10 m.) le diamètre libre intérieur de ce revêtement, ce qui devait entraîner le refouillement de la maçonnerie exécutée avec 10 pieds (3,05 m.) seulement.

Le revêtement (fig. 186) se composait d'anneaux de 10 pieds 10 pouces (3,30 m.) de diamètre extérieur et 16 pouces (0,41 m.) de largeur. Ils se composaient de 9 segments de 3 pieds (0,91 m.) de développement et d'une clef de 8 pouces (0,20 m.), réunis par des boulons de 1 pouce (0,025 m.) de diamètre, au moyen de nervures venues de fonte sur les bords et faisant une saillie de 4 pouces (0,10 m.). Les nervures et l'enveloppe avaient une épaisseur de 1 pouce 1/4 (0,03 m.), sans compter quelques renforcements. Tous les joints étaient rabotés et les trous de boulons étaient alésés à la dimension de 3/16 pouce (0,0045), de façon à permettre l'ajustage. La clef pesait 100 livres (45,36 kg.) et les autres segments 350 livres (158,76 kg.). Le revêtement pesait donc environ 2 400 livres par pied courant (3 600 kg. par mètre courant).

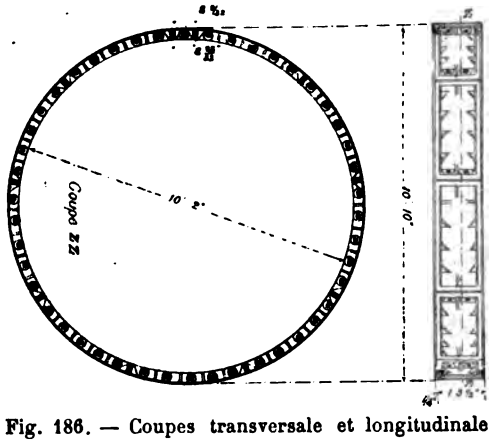


Fig. 186. — Coupes transversale et longitudinale du revêtement en fonte.

Deux des segments supérieurs de chaque anneau portaient un trou de 1 pouce 1/2 (0,037 m.), muni d'un bouchon vissé. On pouvait y introduire une lance et y injecter du mortier de ciment de Portland clair, avec une pompe à bras de 100 livres (7 kg.) de pression, pour remplir les cavités laissées derrière l'enveloppe. On

injecta ainsi deux barils (327 litres) par pied de souterrain (1 m³ par mètre courant) et on aurait pu en introduire une quantité presque indéfinie dans le terrain tendre.

On eut à faire quelques rectifications de direction. On insérait à cet effet entre les anneaux des cercles en fer de 10 pieds 10 pouces (3,30 m.) de diamètre extérieur et 10 pieds 7 pouces 1/2 (3,24 m,) de diamètre intérieur. Leur épaisseur était par exemple de 1 pouce 1/2 (0,037 m.) d'un côté et un 1/2 pouce (0,013 m.) de l'autre, et ils présentaient deux faces faisant un angle très faible.

La figure 187 est une vue de la galerie avec son revêtement.

Reprise du travail. — A ce moment les difficultés avec l'entrepreneur s'aggravèrent et durent être portées devant les tribunaux. Il en résulta un arrêt du travail jusqu'au moment où la Compagnie put prendre possession du chantier et travailler avec ses propres agents.

Fig. 187.
Vue du revêtement en fonte.

On perdit beaucoup de temps à refouiller la maçonnerie faite pour y placer les anneaux, qui furent prolongés sur une certaine distance de part et d'autre du terrain tendre et on bloqua les extrémités avec de la maçonnerie, de façon à bien relier et arrêter les injections.

Quand ce travail fut terminé, à la fin de juillet, on put supprimer l'air comprimé et reprendre l'avancement dans le rocher; mais à peine en eut-on traversé 10 pieds (3,05 m.) qu'on retrouva une nouvelle veine de terrain tendre à 80 pieds (24,39 m.) de la première. On fit un forage à 70 pieds (21,34 m.) sans rencontrer le terrain solide. Pour ce forage on se servit d'un tuyau en fer creux de 1 pouce 1/2 (0,037 m.) de diamètre que l'on faisait avancer à l'aide d'une perforatrice; à chaque allongement, on lavait les débris en introduisant un petit tuyau de 1/4 de pouce (0,006 m.) de diamètre. Ce sondage donna la coupe suivante :

3	pieds	(0,91 m.) de feldspath gris décomposé et chlorite,
11	—	(3,35 m.) boue noire tendre, avec blocs de bois carbonisés,
19	—	(5,79 m.) boue noire dure et sable avec nodules de pyrite,
22	—	(6,71 m.) feldspath gris décomposé,
4	—	(1,22 m.) feldspath décomposé et chlorite,
11	—	(3,35 m.) feldspath gris décomposé ;
70	—	(21,33 m.)

L'eau réapparut sur la surface de séparation des terrains, mais on put la maintenir en grande partie avec l'air comprimé. Comme les sondages ne faisaient pas prévoir de difficultés nouvelles, on résolut de procéder comme pour la première veine. On employa toujours le revêtement métallique provisoire, seulement au lieu de le doubler en maçonnerie, on résolut d'y placer de suite le revêtement en fonte. On attaqua le 7 août; mais, deux jours plus tard, après s'être avancé de 6 pieds (1,83 m.) dans le terrain tendre, ordre fut donné de suspendre le travail pour des motifs d'ordre financier. Il eût été plus sage de ne pas laisser ouvrir cette galerie; car le terrain, mis en mouvement, se ramollit sous l'action de l'eau et une grande quantité de boue pénétra dans la galerie.

Pendant cette période d'arrêt, on fit un sondage dans la galerie de Long-Island. On sait que cette galerie avait été abandonnée après la construction d'une cloison en briques et d'un sas à air. En introduisant l'air comprimé on diminua la venue d'eau; mais on remarqua que, malgré la grande profondeur de la galerie au-dessous de la rivière, l'air commençait à se perdre à 0,7 kg. et qu'à 35 livres (2,4 kg.) des bulles d'air se dégageaient dans la rivière à 300 pieds (91 m.) de part et d'autre du souterrain. Cela semblait indiquer qu'il s'était formé, à la suite des éboulements, des vides qui s'étendaient à une faible distance du fond du lit.

Pour le sondage, comme on savait que la veine tendre contenait des blocs isolés, on employa des tuyaux de 2 pouces (0,05 m.) en acier creux, soigneusement accouplés et terminés par une arête tranchante en acier. On procéda, comme du côté de New-York, et après avoir traversé plusieurs veines de chlorite et de roche tendre, on atteignit le rocher dur à 32 pieds (9,75 m.). On continua le sondage, en introduisant un tuyau pointu de 1 pouce (0,05 m.)

passant dans le premier, jusqu'à une distance de 54 pieds (16,45 m.) et on reconnut une roche calcaire blanche.

Emploi du bouclier. — Il n'y avait de chance d'aboutir qu'en utilisant les amorces de galerie déjà construites ; on résolut donc

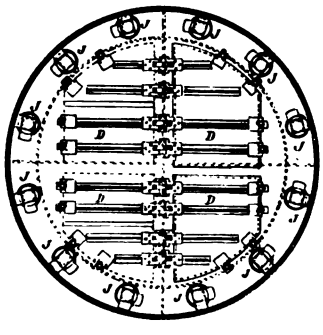


Fig. 188.
Elévation arrière du bouclier.

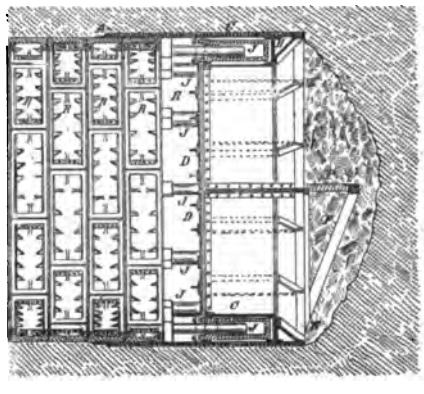


Fig. 189.
Coupe longitudinale du bouclier.

de recourir cette fois à une méthode sûre et on n'hésita pas, malgré les grands frais d'installation et la perte de temps, à recourir au bouclier. Comme on ignorait sur quelle longueur la veine tendre

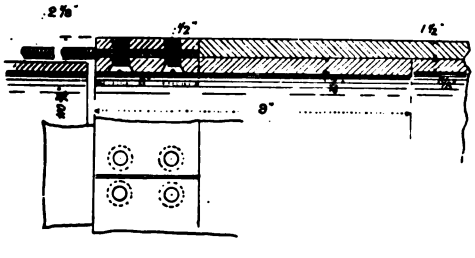


Fig. 190.
Détails de la queue du bouclier.

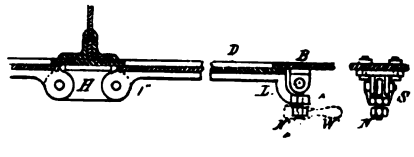


Fig. 191.
Détails des portes.

pouvait s'étendre, on construisit le bouclier de manière à pouvoir le démonter quand on aurait atteint le rocher, et on constitua un bouclier « portatif ». En outre, comme on ne pouvait sans danger supprimer l'air comprimé, il fallut l'apporter en morceaux assez petits pour pouvoir passer par les sas à air. On sépara donc la queue, qui sert au montage du revêtement, de l'avant-bec qui porte

le couteau et sert de chambre de travail, et chacune de ces parties comprit quatre morceaux.

Les figures 188 et 189 donnent une vue générale du bouclier en position avec une coupe du cuvelage. Le bouclier se composait d'un cylindre en acier de 7 pieds 6 pouces (2,29 m.) de longueur et 11 pieds 3/4 pouce (3,37 m.) de diamètre extérieur; il existait une cloison transversale, qui partageait la queue d'une longueur

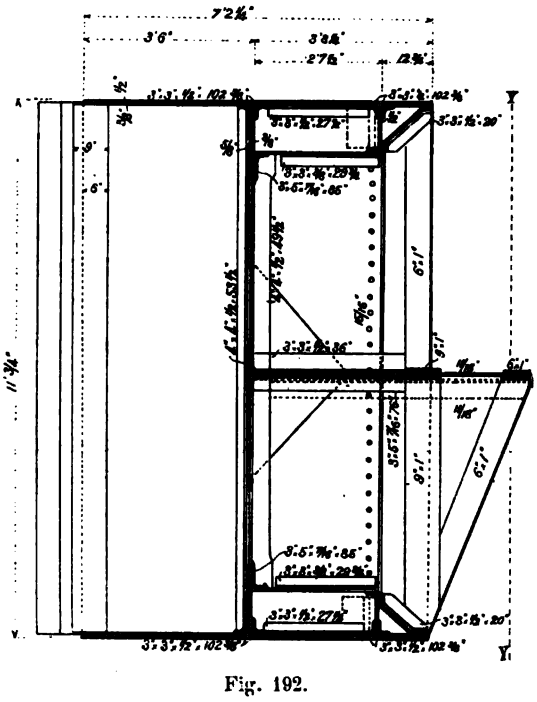


Fig. 192.

Coupe du bouclier suivant ZZ de la figure 191.

de 3 pieds 6 pouces (1,07 m.) de l'avant-bec qui se trouvait avoir 3 pieds 8 pouce (1,11 m.). Cet avant-bec était ramené au diamètre de 9 pieds (2,74 m.) par un second cylindre concentrique, réuni à la paroi extérieure juste derrière le couteau E,E par un tronc de cône. L'espace annulaire entre les deux cylindres est partagé en 12 chambres C, dans chacune desquelles est placé un vérin hydraulique J, dont la tige va prendre point d'appui sur le dernier anneau posé du cuvelage R.

P est une plate-forme de travail, sur laquelle se placent les

hommes pour exécuter la fouille et rejeter la terre par les portes de la cloison D,D, que l'on peut fermer quand le sol devient trop mouillé. H,H, sont des goussets qui maintiennent les vérins dans leur chambre et A,A sont des rubans de caoutchouc (fig. 190) qui font joint et empêchent les pertes d'air ou les rentrées d'eau quand le bouclier s'avance sur le cuvelage. La figure 191 donne quelques détails des portes.

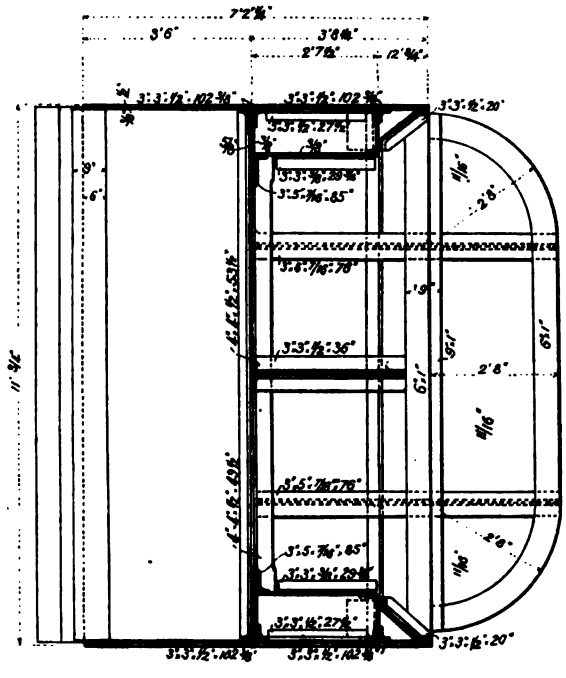


Fig. 193.
Coupe du bouclier suivant XX de la figure 194.

H est la charnière et L le moraillon alésé et traversé par un boulon S, pivotant sur la cloison et auquel se visse un écrou N avec une manette W. Quand l'écrou est desserré, on tourne le boulon, le moraillon est dégagé et l'on peut ouvrir la porte.

Sur les figures 192 à 194 on peut trouver les dimensions et la disposition des diverses pièces du bouclier. La chemise se composait de deux tôles, l'une d'un 1/2 pouce (0,0127 m,) et l'autre de 3/8 de pouce (0,0095 m.). Aux joints, il y avait des plates-bandes d'un 1/2 pouce (0,0127 m.) d'épaisseur et 12 pouces (0,30 m.) de

largeur, pour réunir les parties démontables du cylindre et relier la queue et l'avant-bec. La cloison se composait de deux épaisseurs

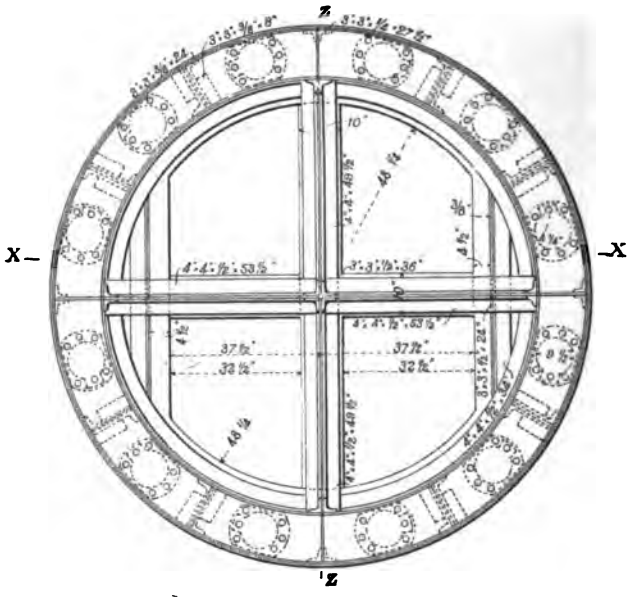


Fig. 194.
Coupe du bouclier suivant YY de la figure 192.

de tôle, rivées à chacun des morceaux et réunies avec des couvre-joints.

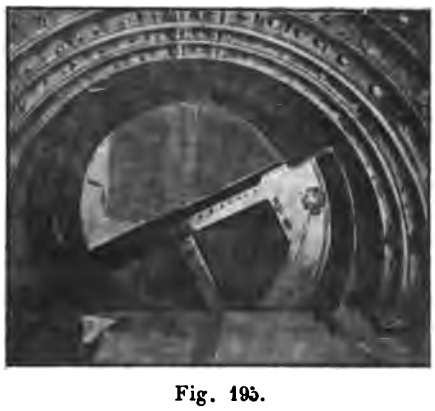


Fig. 195.
Montage du bouclier. — 1re phase.

Pour le montage, il n'y avait qu'à river les quatre couvre-joints dans la queue où l'on avait besoin d'une surface lisse à l'intérieur et à l'extérieur. Pour l'avant-bec, les couvre-joints étaient fixés avec des boulons à tête fraisée. On y employa 380 boulons et 160 rivets de 7/8 pouce (0,022 m.) de diamètre, espacés d'environ 4 pouces (0,10 m.). Le poids total était de 12 t. (10,886 kg.)

Les figures 195, 196, 197 représentent une partie du bouclier

monté, le bouclier en cours de travail et le même après un parcours de 100 pieds (30,48 m.).

La figure 198 représente l'un des douze vérins hydrauliques qui

Fig. 196.
Montage du bouclier. — 2e phase.

Fig. 197.
Vue du bouclier en cours de travail.

actionnaient le bouclier. Ils étaient construits pour une pression maxima de 5 000 livres par pouce carré (352 kg. par cm²) et pouvaient développer un effort total de 1 200 000 livres (544 t.) qu'il a

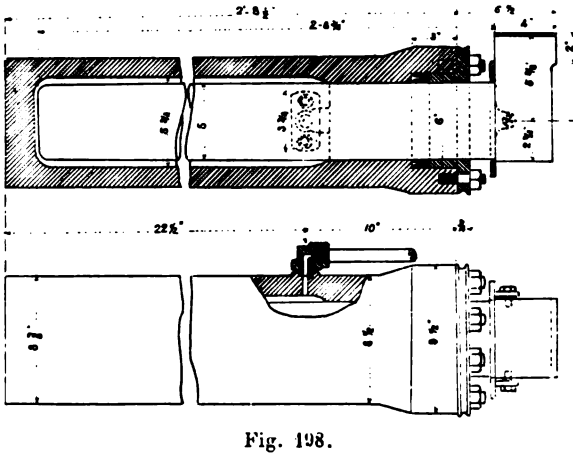


Fig. 198.
Plan et coupes des vérins hydrauliques.

Fig. 199.
Joint flexible.

fallu employer à diverses reprises pour faire avancer le bouclier.

Il est un talon excentrique à l'aide duquel la tige s'appuie contre le revêtement en fonte. Chaque vérin est muni d'un tuyau pour

l'admission et l'échappement de l'eau. Le bouclier était rattaché à la canalisation générale par un tuyau en forme de V, à joints flexibles, de 1 pouce de diamètre (0,025 m.) qui permettait le déplacement (fig. 199).

Fig. 200.
Vue d'ensemble d'une boîte à robinets.

Le tuyau d'un 1/2 pouce (0,0127 m.) venant de chaque vérin aboutissait à une boîte à robinets. Ces boîtes (fig. 200 et 201), étaient au nombre de deux, placées de chaque côté et desservant chacune six vérins. Le tuyau de pression, fixé en A, introduisait l'eau dans une chambre B, tamponnée aux extrémités et percée de six ouvertures communiquant avec les pièces D, dans lesquelles étaient vissées les tuyaux des vérins. La communication était commandée par des robinets F à l'aide desquels on pouvait mettre les vérins en com-

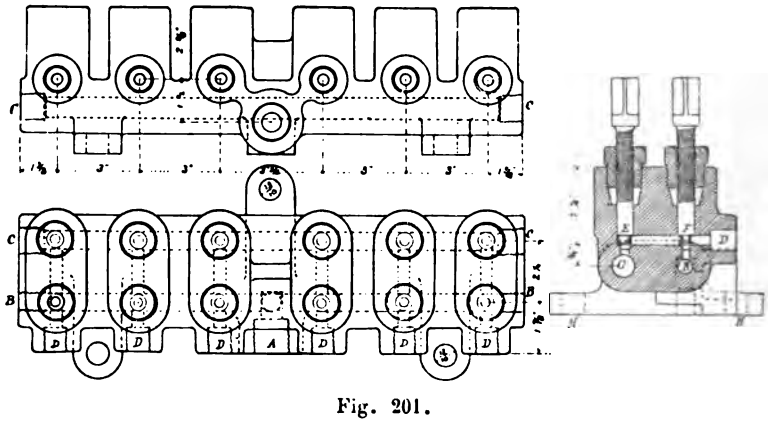


Fig. 201.
Elévation, plan et coupe d'une boîte à robinets.

munication soit avec la chambre B, soit avec la décharge C que fermaient les robinets E. Tous les vérins pouvaient ainsi se manœuvrer indépendamment les uns des autres.

Installations accessoires. — La figure 202 est un croquis de

l'installation au puits Ouest, analogue d'ailleurs à celle du puits Est. La vapeur était fournie par trois chaudières de 60 chev. et une chaudière locomotive de 50 chev. Ces chaudières alimentaient les machines et les pompes.

La lumière électrique était prise directement sur les câbles de distribution de la ville.

L'ascenseur du type Lidgerwood était muni de griffes de sûreté et

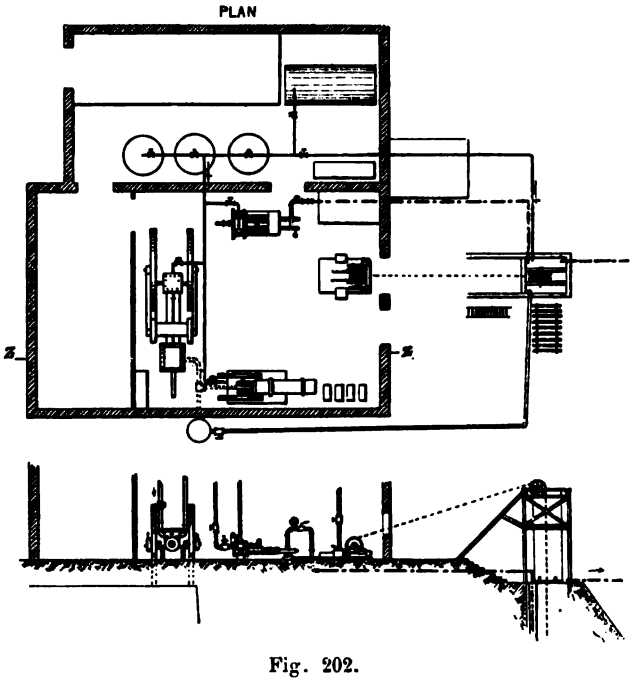


Fig. 202.
Plan et coupe de l'installation mécanique.

guidé par quatre câbles métalliques. Il était actionné par une machine à simple tambour de Crook avec deux cylindres de 8 pouces × 12 pouces (0,20 m. × 0,30 m.). Les signaux étaient donnés du bas du puits et répétés dans l'usine à l'aide de coups frappés sur un gong. Les mécaniciens agissaient sur la machine par une valve d'admission de vapeur et un frein à friction. Des marques fixes sur le câble leur indiquait les points d'arrêt.

On a déjà dit qu'il y avait un petit compresseur Rand et un compresseur Ingersoll de 18 pouces × 24 pouces (0,47 m. × 0,61 m.) faisant 138 tours à la minute. Ce dernier a dû tourner

vingt-six heures sans arrêt et fournir l'air à la pression de 48 livres (3,375 kg.).

La pompe spéciale pour l'eau sous pression était très ramassée de manière à ménager la place (fig. 203). Elle fut fournie par Watson et Silman, de New-York, qui livrèrent également les vérins hydrauliques et leur robinetterie. Dans la figure, I, I, sont les valves d'aspiration, et EE les lumières d'admission. L'espace annulaire autour du piston est beaucoup plus petit que la section du cylindre, de sorte que, quand le piston se meut vers la gauche, il est déchargé beaucoup moins d'eau par B qu'il n'en est reçu par E, la valve O est alors fermée par la pression et les valves I

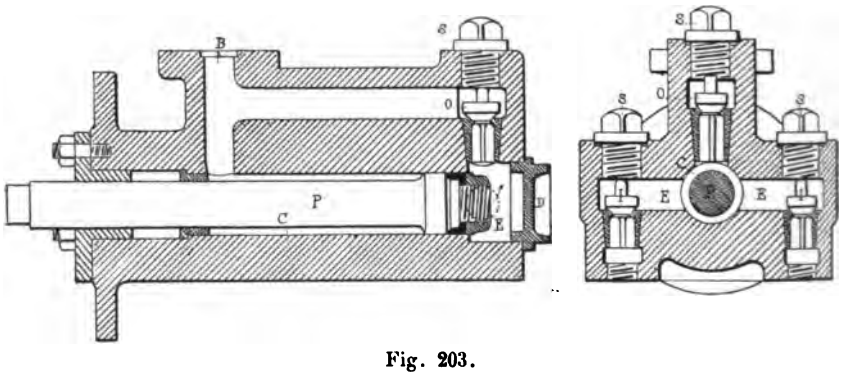


Fig. 203.
Coupes longitudinale et transversale de la pompe de compression.

s'ouvrent. Quand le piston retourne à droite, les valves I se ferment et la valve O s'ouvre pour permettre à l'eau de pénétrer dans le tuyau B et le reste entre dans l'espace annulaire autour de P. La pompe travaillait à 5 000 livres (352 kg.) de pression et était réglée par une valve à vapeur automatique.

La figure 204 représente les joints des tuyaux d'eau sous pression. Les bouts des tuyaux étaient filetés et vissés dans les collets A et B. Ils faisaient saillie d'environ 1/4 pouce (0,006 m.) sur le collet B et ne pénétraient que sur une partie de l'épaisseur du collet A. Dans l'espace libre entre les bouts des tuyaux était insérée une rondelle de cuir. Quand on serrait les colliers par des boulons, toute la pression se trouvait reportée sur la rondelle de cuir qui faisait un bon joint.

La figure 205 représente l'un des vérins hydrauliques employés

pour le montage des segments du revêtement en fonte. Ce vérin était réuni par un tuyau N et un robinet à 3 voies au tuyau d'alimentation d'eau sous pression.

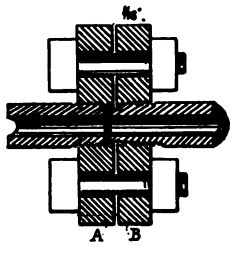


Fig. 204. — Joint des tuyaux d'eau sous la pression.

Les faibles dimensions des puits rendaient très difficile la vérification de l'alignement. On suspendait dans le puits, de l'échafaudage supérieur, deux fils à plomb espacés de 8 pieds (2,74 m.) l'un de l'autre, et composés de cordes à piano, portant des poids de 12 livres (5,4 kg.) plongeant dans l'eau en bas du puits. A l'aide de ces deux fils, on détermina un point à 100 pieds (30,48 m.) et quand sa position ne varia que de 3/8 pouce (0,01 m.) dans trois opérations, on le considéra comme exact. On marqua le point ainsi déterminé à l'aide de clous en cuivre fixés sur des tampons en bois, dans la partie ouverte dans le rocher; dans les parties revêtues en fonte, on le marqua directement sur les nervures à l'aide d'un ciseau.

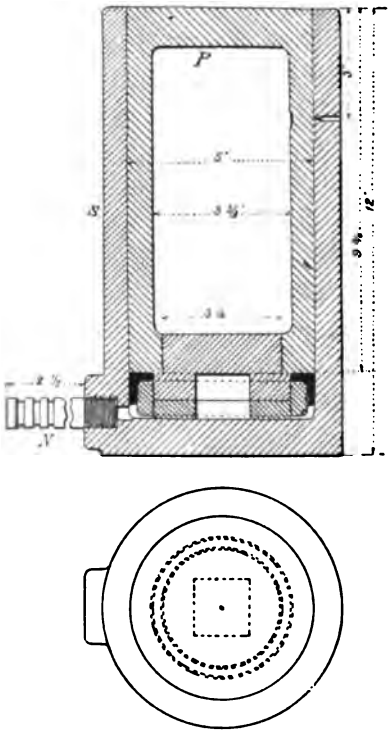


Fig. 205.
Vérin de levage des segments.

Quant au nivellement, on se repérait à une marque faite sur un bouchon en fer scellé au plomb dans la paroi latérale du puits; on établit ensuite des niveaux semblables dans les parois rocheuses du souterrain. Dans la partie revêtue en fonte, on fixa sur les nervures des pièces de chêne d'environ 12 pouces (0,30 m.) de côté et 2 pouces (0,05 m.) d'épaisseur. Le niveau se vissait à des colliers fixés sur cette pièce; une fois la hauteur de l'instrument déterminée, on pouvait en déduire la hauteur d'un point quelconque par les procédés ordinaires.

Marche du travail. — Le 22 septembre, le travail fut repris

du côté de New-York, avec une équipe de jour, occupée à fouiller dans le radier un élargissement, à 15 pieds (4,57 m.) environ en arrière du front de taille, pour permettre la construction du bouclier. Cette chambre reçut une forme circulaire de 15 pieds (4,57 m,) de diamètre et 10 pieds (3,05 m.) de longueur. En arrière, on régla le rocher, suivant une section circulaire de 11 pieds (3,35 m.) de diamètre, sur 14 pieds (4,27 m.) de longueur ; et on y plaça 10 anneaux de fonte soigneusement injectés de ciment. Ces anneaux faisant corps avec le rocher devaient servir de point d'appui pour l'avancement du bouclier.

Pendant tout ce travail d'élargissement dans la roche, on n'employa que des mines aussi faibles que possible. Néanmoins l'ébranlement se fit sentir dans la partie tendre, et une grande quantité de boue noire coula à travers les blindages provisoires, tandis que les étais étaient fortement serrés par la pression.

Le bouclier arriva sur le chantier le 10 novembre, on descendit aussitôt les morceaux, on les éclusa et on procéda au montage. Le 17 novembre, le bouclier était monté et on commença la pose des rivets de la queue. La forge employée au chauffage des rivets était munie d'une hotte qui communiquait par un tuyau de 2 pouces (0,05 m.) de diamètre avec l'extérieur de la galerie. Un robinet réglait l'échappement de l'air et des gaz sous l'effet de la pression. On évita ainsi l'infection de la chambre de travail par les gaz délétères. Aussitôt le rivetage terminé, on régla exactement le bouclier et on fit les joints. Le 24 novembre, on reçut l'ordre d'activer le travail, et on installa 3 équipes travaillant chacune huit heures.

Après avoir complété le revêtement métallique jusqu'au bouclier, on commença à l'avancer en élargissant convenablement la fouille. On atteignit ainsi la cloison de blindage provisoire. C'était la partie la plus difficile du travail ; le rocher qui montait encore jusqu'à 12 pieds (3,66 m.) plongeait lentement vers Long-Island sous un angle de 40° ; il fallait continuer à le miner dans la chambre du bas, tandis que le haut du bouclier avait déjà pénétré dans le terrain mou. Au début on eut beaucoup de peine à empêcher l'invasion de ces chambres inférieures par la boue. Le terrain sur le plan de séparation s'était tellement ramolli que l'on

ne pouvait le maintenir. A diverses reprises les matières fluentes firent invasion, si bien qu'il finit par s'établir une communication directe avec le fond du lit ; on recueillit des crabes, des moules, des galets, de vieilles bottes, de vieux souliers, des linges, de la ferblanterie, etc., toutes matières venant directement de la rivière. Malgré ces circonstances défavorables, on avançait toujours ; mais il fallait maintenir la pression à 45 livres (3,2 kg.) et l'air s'échappait abondamment en produisant un fort bouillonnement dans la rivière. Ce courant d'air retardait l'arrivée d'eau, et la mauvaise qualité du terrain qui se délayait avec elle en une boue épaisse, l'empêchait d'arriver trop abondamment.

Enfin le 13 décembre, le bouclier sortit du rocher et se trouva entièrement dans la boue. Le plus difficile était fait et on put avancer rapidement et atteindre le terrain sec non bouleversé par les travaux antérieurs. C'était toujours la même boue noire, comme de la tourbe, mélangée de blocs de bois carbonisé et de pyrites qui brillaient comme de l'argent. Les hommes pouvaient maintenant fouiller dans les chambres jusqu'à 1 pied (0,30 m.) en avant du couteau. On avançait alors le bouclier de 16 pouces (0,41 m.) de la largeur d'un anneau et le terrain découpé remplissait les chambres qu'il fallait déblayer avant de reprendre l'avancement. Le 24 décembre, on sortit de la boue et on trouva au-dessus, sous le même angle de 40°, un lit de feldspath blanc contenant des fragments de quartz décomposé et chargé d'hydrogène sulfuré.

A partir de ce moment, on apporta un changement important dans la pose du revêtement. Au lieu de placer les joints horizontaux en ligne, on les brisa. L'ingénieur, M. Aims avait déjà reconnu au souterrain de la rivière de l'Hudson la nécessité de donner une grande rigidité au revêtement dans les terrains tendres qui tendent par leur pression à le déformer. La pression a pour effet d'écraser les anneaux et de réduire le diamètre vertical. Cette déformation a pour double résultat d'accroître la pression et de diminuer la force de résistance des anneaux. Quand les joints sont continus, tout l'effort se reporte sur les boulons et les nervures des joints horizontaux. A l'Hudson où divers accidents se produisirent, on construisit, pour étudier la question, un anneau

que l'on monta d'abord à plat sur le sol en lui donnant la forme d'un cercle parfait, puis on serra avec soin les boulons de joint. On redressa ensuite l'anneau avec une grue, de manière à le mettre debout, et l'on reconnut qu'il s'aplatissait de 3 pouces (0,076 m.) sous son propre poids. On recommença, à la rivière de l'Est, le même essai avec deux anneaux, dont les joints furent brisés. On ne put constater d'aplatissement. Au moyen d'une vis de serrage, on appliqua, sur le diamètre vertical, une force de 16 000 livres (7 258 kg.). Le diamètre vertical se réduisit d'un 1/2 pouce (0,0127 m.) et des fissures se déclarèrent par des trous de boulons. Cet abaissement est certainement beaucoup moindre, mais il ne faut pas oublier que le diamètre n'était que de 10 pieds 2 pouces (3,10 m.) tandis qu'il était de 18 pieds (5,49 m.) à l'Hudson et que le revêtement de ce dernier souterrain était notoirement trop faible. Mais ce mode d'assemblage avait d'autres avantages. Avec les joints continus on est en effet exposé à deux inconvénients :

1°. — Les joints entre deux anneaux peuvent être légèrement gauches, au lieu de présenter une surface plane. Cela peut être dû à un défaut de soin dans la pose ou à des parcelles de terres laissées dans le joint. Une fois que cela s'est produit, le mal ne fait que s'aggraver, et il arrive un moment où l'on ne peut plus assembler un anneau.

2°. — Les anneaux peuvent se déformer et perdre la forme circulaire, tandis qu'en recoupant les joints, l'erreur se rectifie d'elle-même.

Le 16 janvier 1894, après avoir traversé 98 pieds (29,87 m.) de terrain tendre, on retrouva le rocher. Ce dernier ressemblait à celui de l'île de Blackwell. On le trouvait en fragments, en blocs séparés par des veines tendres. Il était nécessaire de continuer le revêtement métallique. Comme on n'était d'ailleurs pas sûr de ne pas retrouver une nouvelle venue de terrain tendre, on continua à marcher avec le bouclier. On avançait de 4 pieds (1,22 m.) par jour. Au bout de 65 pieds (19,81 m.), le rocher devint de plus en plus ferme et assez solide pour pouvoir se dispenser du revêtement. On se disposa à démonter le bouclier. Ce travail commencé le 18 février fut fait en deux jours.

Au moment où l'exécution du souterrain, à l'aide du bouclier, se terminait du côté de New-York, on achevait l'installation du côté de Long Island. On avait d'abord eu l'intention de réemployer le même outillage; mais il avait paru préférable de faire une seconde installation complète et de construire un second bouclier, afin de ne pas être pris au dépourvu, si on venait à rencontrer le terrain tendre à la fois dans les deux attaques.

Dans la galerie de Ravenswood, on n'éprouva pas de difficultés graves. On avait affaire à de la vase mêlée de fragments de roche tendre et de chlorite verte. On mit environ un mois à traverser cette veine de 32 pieds (9,75 m.), démonter le bouclier et prolonger le cuvelage de part et d'autre dans le rocher.

A partir de ce moment, l'avancement dans le rocher fut très rapide aux deux attaques. On donnait une prime aux ouvriers, qui percèrent en moyenne 69 pieds (21,03 m.) par semaine. La plus grande vitesse, atteinte du côté de Ravenswood, fut dans la dernière semaine de juin 95 pieds (28,96 m.), et, du côté de New-York, 101 pieds (30,78 m.), soit ensemble 196 pieds (59,74 m.).

Du côté de New-York, on avait rapidement atteint l'île, et on travaillait en toute sécurité; mais, du côté de Ravenswood, tant qu'on restait dans le calcaire, on pouvait craindre de retrouver une mauvaise veine, surtout au point de contact avec le rocher granitique de l'île. Cela se produisit en effet : la veine tendre fut atteinte quand on eut traversé le calcaire sur 350 pieds (106,68 m.), et on dut recourir à l'air comprimé. Heureusement cette veine n'avait que 14 pieds (4,27 m.) et on put la traverser sans remonter le bouclier. On établit néanmoins un cuvelage en fonte. Aussitôt après, on pénétra dans le gneiss granitique et on se trouva à l'abri des accidents.

Du côté de New-York, on perdit trois semaines, par suite d'un incendie, qui prit à côté du chantier dans des constructions légères et détruisit toute l'installation.

On fit sauter les 15 derniers pieds (4,57 m.) de galerie le 11 juillet 1894, après deux ans de travail, et, le 15 octobre, le gaz pouvait être livré à New-York.

Conclusions. — Cet important travail fut exécuté sous la

direction de M. Emerson Mac Millen, président de la compagnie, par MM. Jacobs de Londres, ingénieur en chef, J.-V. Davies, ingénieur chargé de l'alignement et du nivellement, et W.-I. Aims, ingénieur chargé de la conduite du chantier.

Ici, comme à la rivière Saint-Clair et à la rivière de l'Hudson, on s'étonne de voir que l'on ait attendu si longtemps, dépensé tant d'argent et de peines, avant de recourir à la méthode du bouclier, qui a permis d'exécuter, avec plein succès, toute la partie difficile du travail. On sent que les ingénieurs, imbus des premières erreurs commises dans son emploi, conservent un préjugé contre le bouclier. Aujourd'hui encore à Boston, pour l'exécution d'un réseau métropolitain, on préfère défoncer les plus belles voies de la ville que d'y recourir.

CHAPITRE IX

SOUTERRAIN DE BLACKWALL A WOOLWICH

(1892-1897)

Emplacement. — Le souterrain de Blackwall est dû, comme celui de Brunel, au besoin toujours croissant de créer des moyens de communication entre les deux rives de la Tamise, en aval du Pont de Londres. En même temps que la construction du pont levant de la Tour, on décida, en 1890, la construction d'un souterrain sous la Tamise, à 6 miles (9 656 m.) en aval du pont de Londres, à 1 mile 1/2 (805 m.) en aval de Greenwich et à trois miles (4 828 m.) au-dessus de Woolwich. Il a pour but de mettre en relation ces deux localités déjà si peuplées et qui s'agrandissent tous les jours avec la partie de Londres, dite Poplar East et West India docks.

Nature du terrain. — Au point choisi pour la traversée, la Tamise a une largeur de 1 200 pieds (365,75 m.) et une profondeur d'eau de 46 pieds (14,02 m.) à marée haute.

Sur les rives munies de quais, le terrain, à l'emplacement d'anciens marais, consiste en débris végétaux, tourbe, sable et gravier jusqu'à une grande profondeur au-dessous des eaux. Après avoir traversé l'argile de Londres sous une faible épaisseur, on trouve les lits de calcaire impur qui en forment la base, puis les sables et argiles du niveau de Woolwich, terrains essentiellement meubles et aquifères, dans lequel le niveau des eaux suit toutes les oscillations de la marée (fig. 206).

La traversée de la rivière devait se faire entièrement dans ces sables et graviers, et il était certain que l'on aurait à lutter contre des

difficultés plus grandes encore que celles qu'avait rencontrées Brunel.

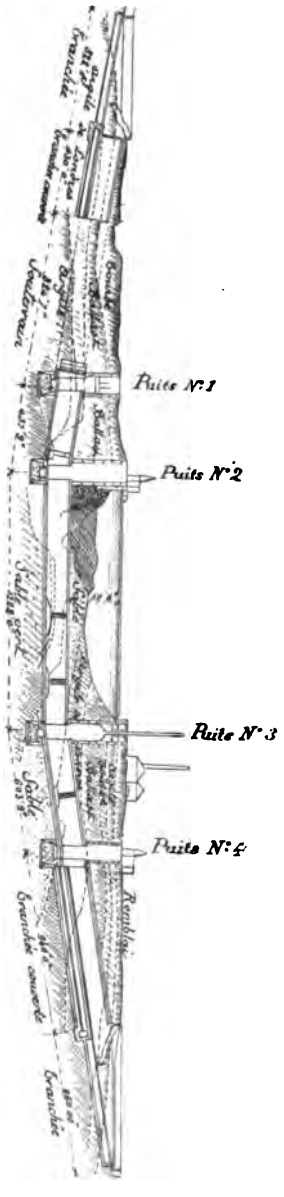


Fig. 206. — Coupe géologique.

Néanmoins, après avoir pris l'avis de Sir Benjamin Baker et de Greathead, le travail fut accepté en 1892, moyennant le payement d'une somme de 871 000 livres (21 775 000 fr.) par MM. Pearson and Sons, les entrepreneurs du souterrain de l'Hudson. Ces derniers avaient comme ingénieur, M. Moir, leur collaborateur en Amérique, tandis que l'administration était représentée par M. Binnie, ingénieur en chef du Conseil de Comté, assisté de deux ingénieurs MM. Hay et Fitz Maurice.

Description générale. — On limita l'inclinaison des rampes d'accès à 1/36 (0,028 m.) sur la rive Sud ou du Kent et à 1/34 (0,03 m.) sur la rive Nord ou Kentucky. D'autre part, on décida que le niveau du palier sous la rivière ne serait pas à plus de 80 pieds (24,38 m.) au-dessous du niveau des hautes eaux, de manière à ne pas dépasser dans le travail à l'air comprimé une pression de 35 livres par pouce carré (2,4 kg.) que l'on considérait comme la dernière limite admissible pour un travail courant avec des équipes nombreuses d'ouvriers.

Ces conditions définissaient le profil qui fut arrêté comme l'indique la figure 207.

Ce profil diffère très peu du profil d'exécution déjà donné ci-dessus. La longueur totale est de 6 200 pieds (1 889,73 m.). Elle se décompose en trois natures d'ouvrages : tranchées avec murs

de soutènement, tranchées couvertes et souterrain. La répartition de ces trois types est donné dans le tableau ci-après :

	Projet.	Exécution.
Tranchées.	1 725	1 742
Tranchées couvertes .	781	1 370
Souterrain.	3 694	3 088
	6 200	6 200

La seule différence importante a consisté à allonger la tranchée couverte, aux dépens du souterrain, sur la rive Sud ou du Kent jusqu'au puits 4. Mais on y a trouvé de telles difficultés qu'il n'a pas été procédé de même sur la rive Nord.

On a exécuté 4 puits aux sommets d'angle, afin d'éviter les courbes et d'assurer la ventilation du souterrain.

Tranchées et souterrain. — Les

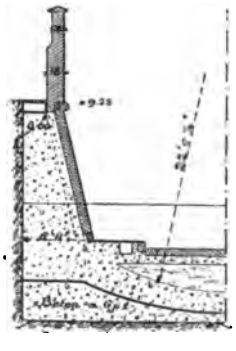


Fig. 208. — Type en tranchée.

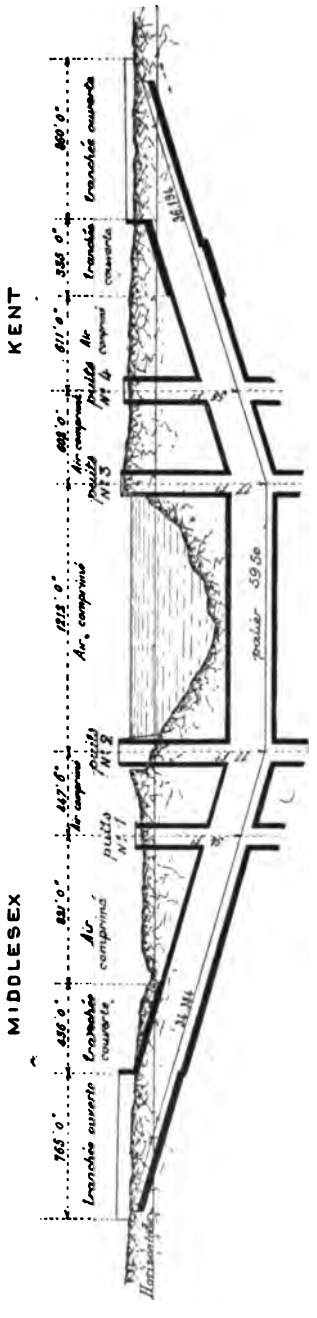


Fig. 207. — Profil en long du projet.

tranchées (fig. 208) sont maintenues par des murs de soutènement, avec parements en briques émaillées

blanches, surmontés de murs de clôtures avec couronnements en pierre de taille. Elles se terminent à l'entrée de la partie couverte par des portes monumentales (fig. 209), à l'intérieur desquelles seront installés divers services. La voûte des tranchées couvertes (fig. 210) est faite en maçonnerie de briques avec une épaisseur de 18 pouces (0,46 m.) à 2 pieds (0,61 m.). Cette voûte est recouverte d'une chape en asphalte de 1 pouce 1/2 (0,038 m.) d'épaisseur et de 2 pieds (0,61 m.) de béton de Portland, de sorte que la plus faible épaisseur de maçonnerie est de 3 pieds 6 pouces (1,07 m.). A l'in-

Fig. 209. — Porte d'entrée.

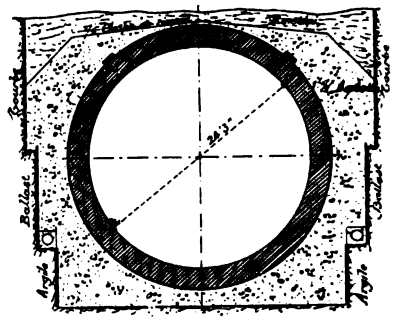


Fig. 210. — Type en tranchée couverte.

térieur, l'aspect est absolument le même que dans le souterrain.

La dimension du souterrain se trouvait limitée, d'une part, par la profondeur de 80 pieds (24,38 m.) que l'on ne voulait pas dépasser, et, d'autre part, par la nécessité de conserver, entre le dessus de l'ouvrage et le fond du lit de la rivière, une couche protectrice de terre de 5 à 10 pieds (1,52 m. à 3,05 m.). En fait, la plus faible épaisseur fut de 5 pieds 6 pouces (1,68 m.), ce qui était d'une grande hardiesse. Le diamètre extérieur fut ainsi fixé à 27 pieds (8,23 m.), ce qui fait du souterrain de Blackwall le plus grand de tous ceux qui aient jamais été construits sous une rivière après celui de Brunel.

Ce souterrain comporte une enveloppe métallique en fonte qui sera décrite plus loin. Les segments de ce revêtement sont remplis de béton de ciment de Portland avec revêtement général en carreaux émaillés blancs, ce qui réduit le diamètre intérieur à 24 pieds

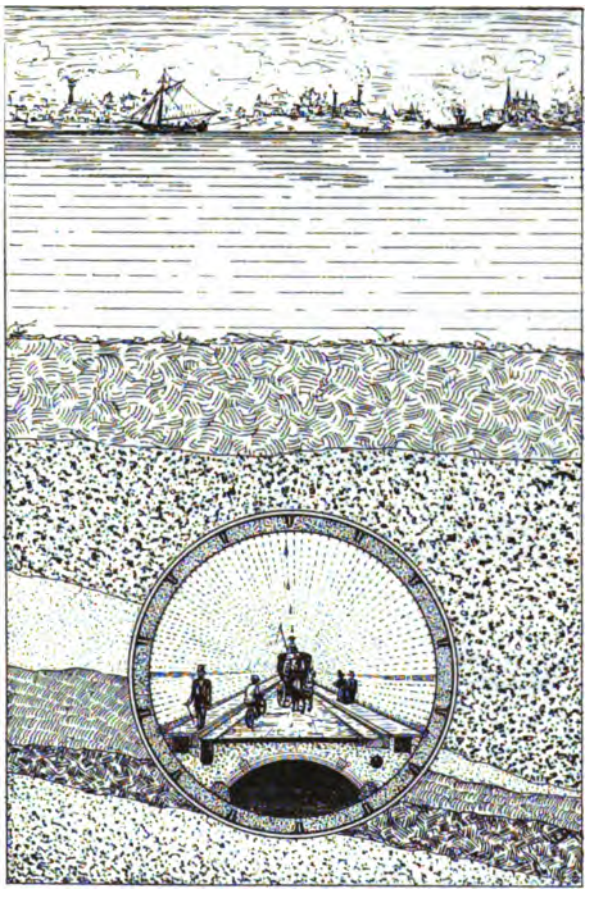


Fig. 211. — Type en souterrain.

3 pouces (7,39 m.). Dans ce souterrain (fig. 211 et 212), existent une chaussée de 16 pieds (4,88 m.) de largeur et deux trottoirs de 3 pieds 1 pouce 1/2 (0,95 m.). Sous ces trottoirs sont placées des conduites d'eau. Sous la chaussée se trouvent des canaux d'assainissement et de petites conduites de lavage. La chaussée est en asphalte dans le palier sous la rivière et en pavés de granit avec

joints au bitume dans les rampes d'accès. Il n'y aura pas de gaz

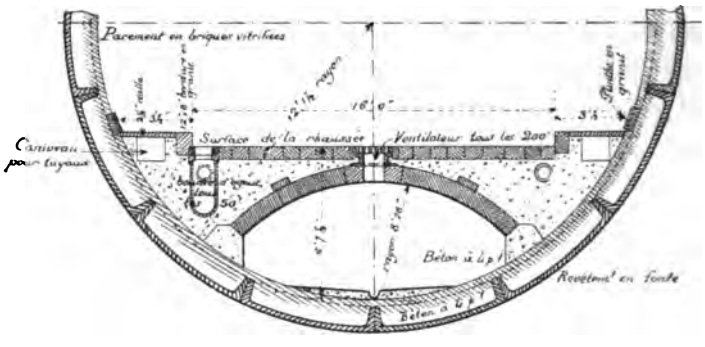


Fig. 212. — Coupe de la chaussée.

et l'éclairage sera assuré par 3 rangées de lampes à incandescence de 32 bougies, placées alternativement tous les 10 pieds (3,05 m.).

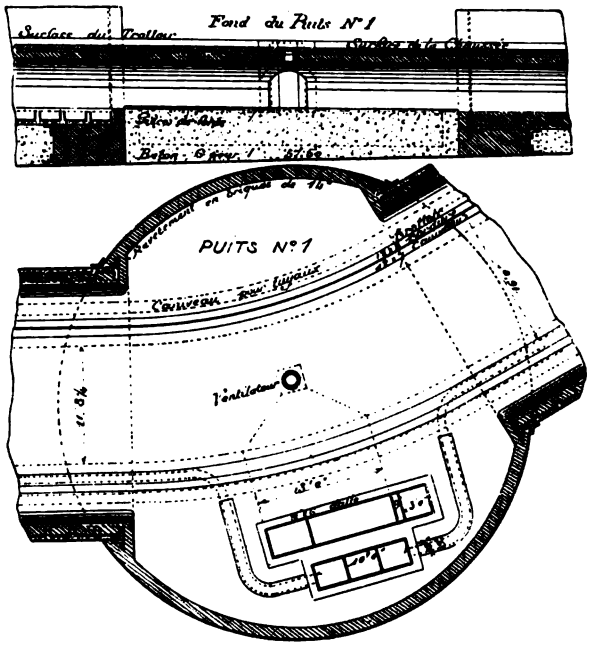


Fig. 213. — Coupes du puits n° 1.

Les puits (fig. 213 à 216) les plus voisins de la rivière contiendront des escaliers d'accès. Le puits 4 sur la rive Sud qui est à

l'intérieur d'une propriété privée sera voûté et muni simplement d'une cheminée de ventilation. Quand au puits 1 sur la rive Nord, il sera affecté à diverses installations, pompes, éclairage, etc.

Revêtement métallique. — Chaque anneau du revêtement a 2 pieds 6 pouces (0,76 m.) de longueur et est formé de 14 segments et d'une clef. L'épaisseur du métal est de 2 pouces (0,05 m.).

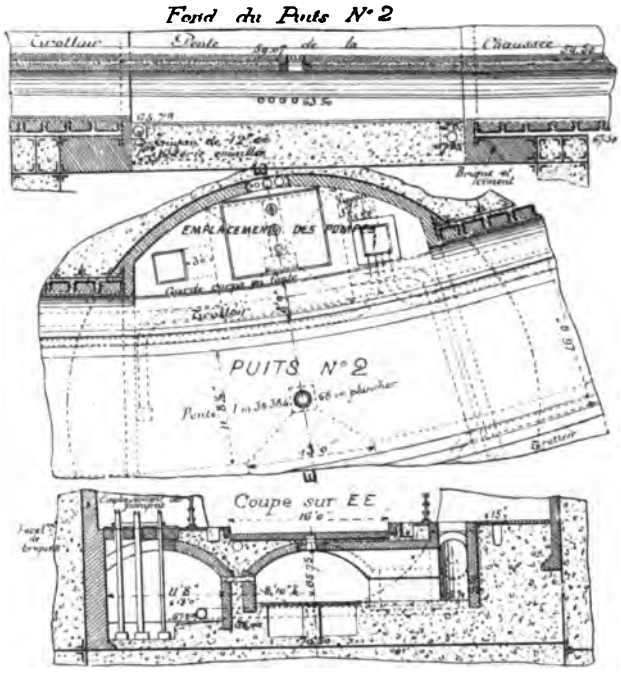


Fig. 214. — Coupes du puits n° 2.

Les nervures qui entourent chaque segment ont 12 pouces (0,30 m.) de profondeur et une épaisseur croissante de l'intérieur à l'extérieur de 2 (0,05 m.) à 3 pouces (0,076 m.). Tous les joints verticaux et horizontaux sont rabotés, mais on a ménagé vers l'intérieur, sur 2 pouces (0,05 m.) de profondeur, un élargissement à 3/8 pouce (0,0095 m.), ce qui permet d'étancher le joint avec du ciment. Toutes les plaques portent au centre un trou fileté de 1 pouce 1/2 (0,038 m.) de diamètre à travers lequel on peut injecter du mortier de ciment pour remplir le vide de 4 pouces (0,10 m.) laissé en

dehors du revêtement par l'avancement du bouclier et dans lequel

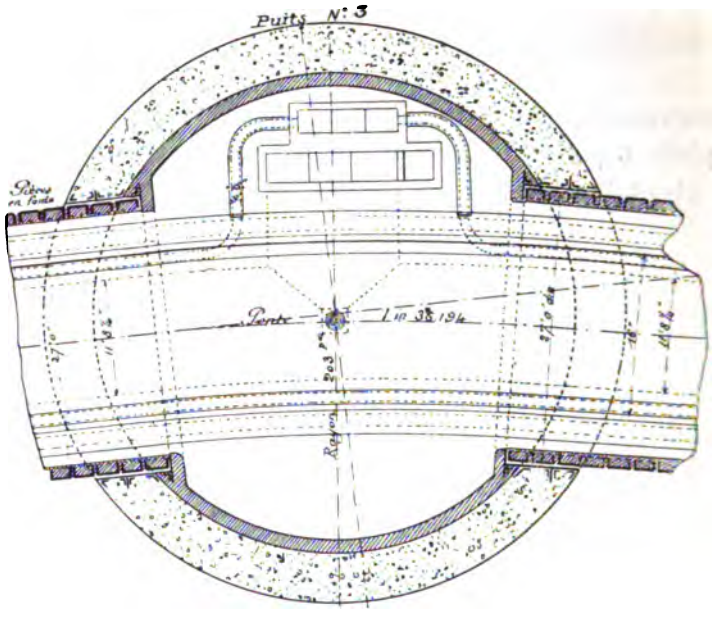


Fig. 215. — Coupe horizontale du puits n° 3.

on visse ensuite un bouchon. Les boulons servant à l'assemblage sont en fer et ont 1 pouce 1/2 (0,038 m.) de diamètre. Chaque

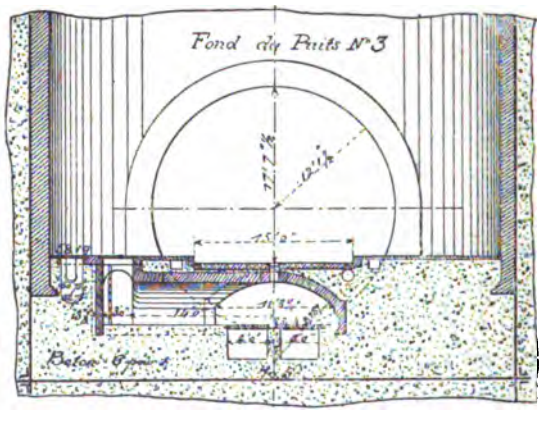


Fig. 216. — Coupe verticale du puits n° 3.

segment pèse un peu plus de 1 t. (1 016 kg.) et l'anneau complet 16 t. 1/2 (16 765 kg.).

Ce type de revêtement a été employé du puits 4 au puits 1. Sur la rive Nord entre le puits 1 et la tranchée couverte, on a un peu diminué les dimensions. L'épaisseur du métal n'est plus que de 1 pouce 1/2 (0,038 m.). Les nervures n'ont plus que 10 pouces (0,254 m.) de profondeur et une épaisseur variant de 1 pouce 1/2 (0,038 m.) à 2 pouces 1/4 (0,057 m.). Ces anneaux, qui ont toujours 2 pieds 6 pouces (0,76 m.) de longueur, ne pèsent que 11 t. 3/4 (11 939 kg.).

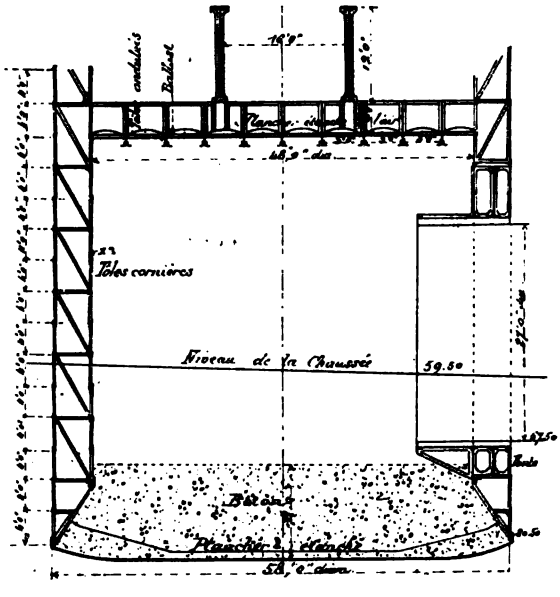


Fig. 217. — Détails de la partie inférieure d'un puits.

Puits. — Les puits ont des profondeurs variant de 75 à 98 pieds (22,86 m. à 29,87 m.); le diamètre intérieur est de 48 pieds (14,61 m.) et le diamètre extérieur de 58 pieds (17,66 m.). Ils se composent essentiellement de deux enveloppes métalliques solidement entretoisées, espacées de 5 pieds (1,52 m.) et dont l'intervalle est rempli de béton au dosage de 6 pour 1.

Les tôles de revêtement ont 3/8 pouce (0,0095 m.) d'épaisseur dans la partie inférieure et 5/16 (0,0079 m.) dans le haut. Ces tôles sont placées à recouvrement et par conséquent, pour conserver un diamètre constant à l'intérieur, on les a inclinées sur la verticale de leur épaisseur. A l'extérieur, on les a au contraire maintenues

verticales et emboîtées les unes dans les autres, ce qui détermine un fruit d'environ 1 p. 100. Par suite l'espace entre les enveloppes va décroissant de 5 pieds (1,52 m.) à 4 pieds (1,22 m.).

A 8 pieds 6 pouces du bas (fig. 217), la paroi intérieure s'infléchit vers l'extérieur pour former le couteau qui est en outre renforcé par une bande d'acier de 2 × 1 pouces (0,05 m. × 0,025 m.). Les deux anneaux du bas sont également en acier, tandis que tout le reste est en fer.

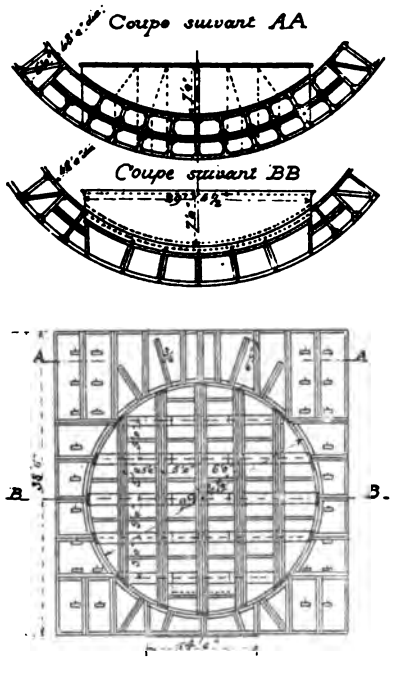


Fig. 218. — Détails d'un tampon provisoire.

On avait ménagé à la partie inférieure deux trous de 29 pieds 4 pouces (8,94 m.) de diamètre pour le raccordement du souterrain de part et d'autre. Le détail de ces ouvertures et l'agencement des pièces destinées à les fermer provisoirement est donné par la figure 218. On trouvera de même, sur la figure 217, le détail de la jonction définitive du revêtement métallique du souterrain et du puits.

Quand le puits était arrivé à profondeur, on formait le fond d'un plancher métallique étanche et d'une couche de béton de 13 pieds (3,96 m.) dont le détail est donné dans la figure 217.

Comme les puits les plus voisins de la rivière devaient être traversés à l'air comprimé, on avait prévu un plancher étanche très solide à quelques pieds au-dessus du souterrain (fig. 217).

Fonçage des puits. — Le caisson n° 4 dont les figures 219 et 220 montrent deux phases du montage, commencé le 21 mai 1892, fut descendu le premier.

On faisait la fouille à mesure de l'enfoncement et le caisson descendait par son propre poids. Ce travail se fit sans grande difficulté.

Il n'en fut pas de même pour le caisson n° 3 ; après être descendu de 80 pieds (24,30 m.), il arriva sur un lit de sable mouvant de 8 pieds (2,44 m.) d'épaisseur que l'on eut beaucoup de peine à traverser ; on craignit d'être obligé de recourir à l'air comprimé, mais en le chargeant de 1 500 t. (1 524 072 kg.) de fer et de briques, ce qui avec le poids du fer et du béton du caisson faisait un poids total de 5 000 t. (5 080 240 kg.) et, avec l'aide de puis-

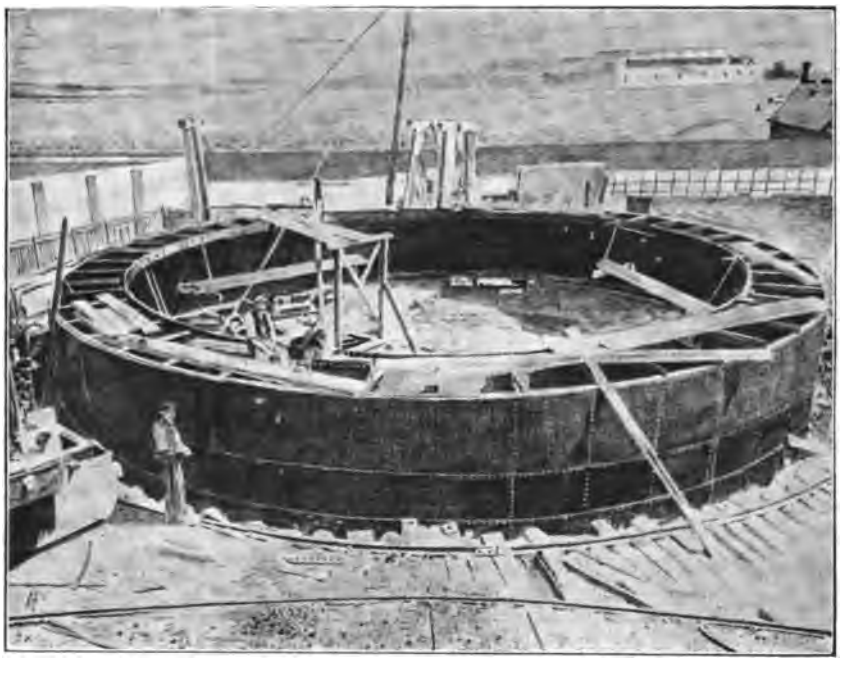


Fig. 219. — Montage du caisson du puits n° 4. — Première phase.

sants épuisements, on réussit à le conduire jusqu'à son niveau définitif. Il était sensiblement d'aplomb ; le devers, qui avait atteint à un moment 14 pouces 1/2 (0,37 m.) avait pu être réduit à 9 pouces (0,23 m.). Pour éviter le retour de pareilles difficultés on descendit les caissons n°s 1 et 2 à niveau plein, en draguant à l'intérieur et en les chargeant quand la descente se ralentissait. On n'eut ensuite qu'à pomper et à construire le radier.

Tous ces puits, après leur achèvement, seront revêtus intérieu-

rement en briques émaillées. Le fonçage du puits 4 dura neuf mois et pendant ce temps on construisit le bouclier.

Le bouclier. — Le bouclier (fig. 221 et 222) est beaucoup plus fort que tous ceux décrits jusqu'ici ; mais en fait, il n'a eu que la force nécessaire. Son diamètre est de 27 pieds 9 pouces 1/4

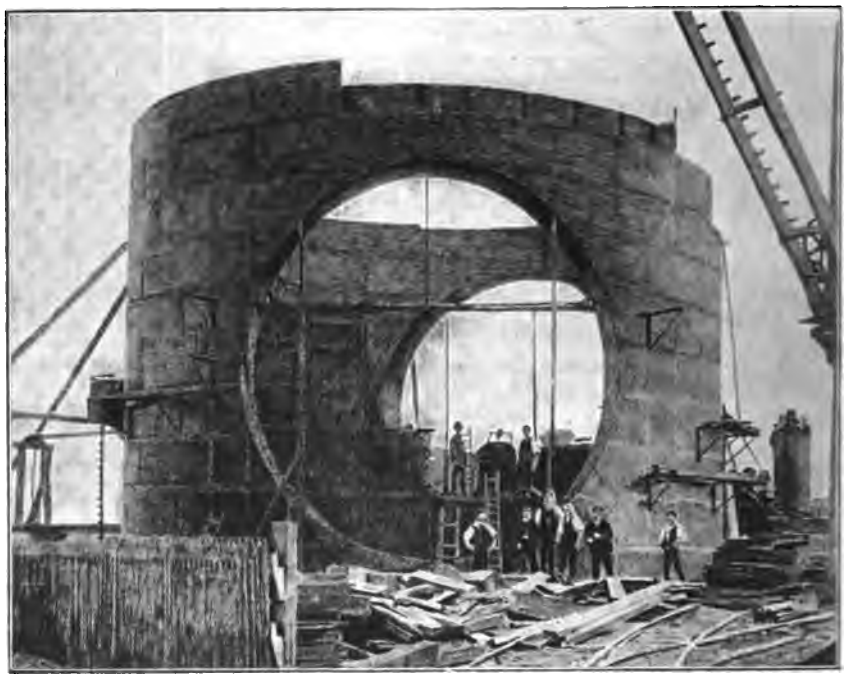


Fig. 220. — Montage du caisson du puits n° 4. — Deuxième phase.

(8,46 m.) et sa longueur de 19 pieds 6 pouces (5,94 m.). L'enveloppe extérieure est formée de 4 épaisseurs de tôles d'acier de 5/8 pouce (0,016 m.) : les joints des diverses couches ne se correspondent pas, de manière que chaque tôle serve de couvre-joint à la tôle du dessus ou du dessous. Deux cloisons verticales, perpendiculaires à l'axe divisent le bouclier en deux parties. Ces cloisons étanches permettraient de maintenir dans la chambre de travail à l'avant une pression supérieure à celle utilisée dans le souterrain, ce qui offre un grand avantage et permet de réduire au minimum le nombre d'hommes obligés de travailler dans l'air à haute pression.

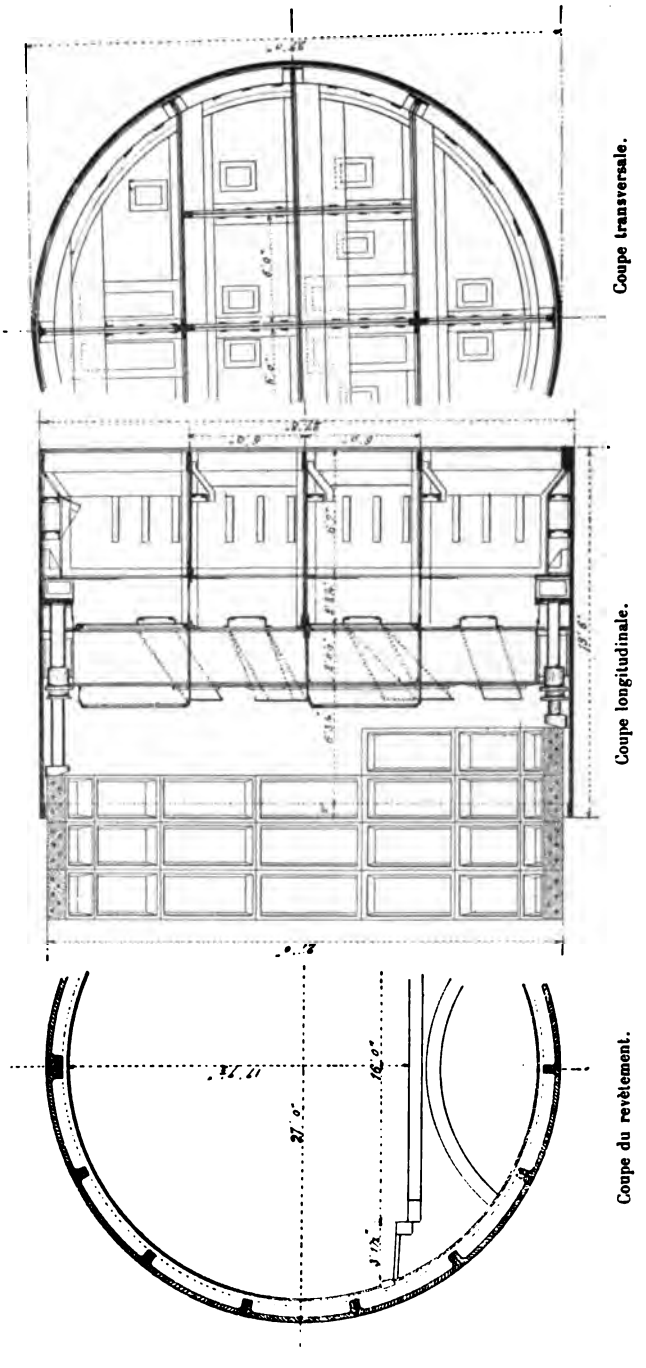


Fig. 221. — Bouclier.

Trois planchers horizontaux se terminant par des trousses coupantes partagent la chambre de travail en 4 étages. Comme surcroît de précaution, à 6 pieds 7 pouces (1,91 m.) en arrière du couteau, il existe à chaque étage des écrans en fer partant du toit et descendant assez bas pour qu'en cas d'afflux d'eau, les hommes, réfugiés derrière cet écran, puissent avoir la tête hors de l'eau, maintenue par l'air comprimé au niveau de son arête inférieure.

La chambre à air était en outre subdivisée par une grande cloison verticale régnant du haut en bas et deux autres analogues,

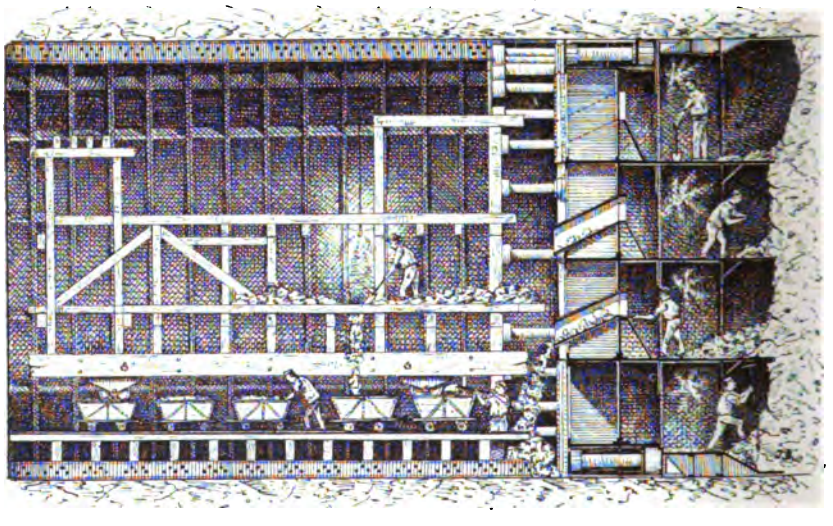


Fig. 222. — Coupe du souterrain et du bouclier pendant le travail.

mais plus courtes, ne régnant que sur la hauteur des deux étages intermédiaires, ce qui décomposait la chambre en 12 cellules de travail.

Il convient de signaler ici une disposition très intéressante, mais dont il n'a malheureusement pas été fait usage, de sorte que l'on ne peut en juger l'efficacité. Le plancher horizontal du milieu partage la chambre de travail en deux parties absolument distinctes à chacune desquelles on accède par 2 sas à air placés dans les cloisons étanches. Ce plancher a reçu une épaisseur suffisante pour que l'on puisse travailler au-dessous et en dessus avec des pressions différentes ; cela avait paru nécessaire en raison de la différence de

13 livres (0,9 kg.) entre la pression nécessaire, en haut et en bas, pour contre-balancer la poussée de l'eau.

A chacun des quatre étages se trouvent, dans les cloisons étanches, des sas à déblais, qui permettent de les évacuer avec une très faible perte d'air. Pour en terminer avec la chambre de travail, il reste à dire que, sur son étendue, la trousse coupante

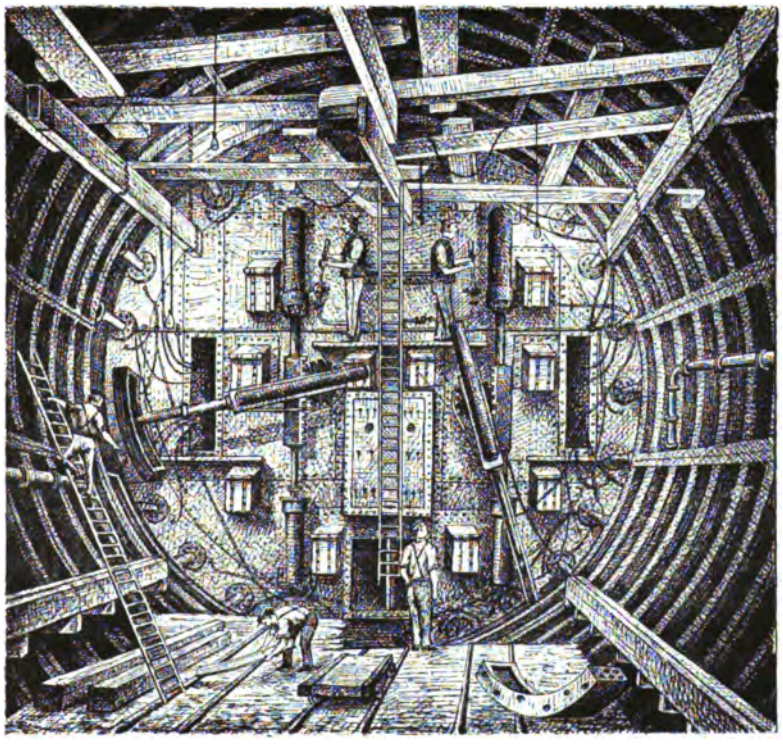


Fig. 223. — Vue arrière du bouclier.

était renforcée par une seconde enveloppe cylindrique, réunie à la première par des poutres longitudinales et circulaires.

Le front de taille restait libre dans chaque cellule ; mais on reconnut plus tard la nécessité d'un blindage. On le composa (fig. 229), dans chaque cellule, de 3 pièces métalliques ou volets, montées au moyen d'écrous sur des vis horizontales fixées aux divisions verticales, ce qui permettait de les avancer ou de les reculer, suivant les besoins du travail, indépendamment les unes des autres.

La chambre arrière du bouclier, ou queue, dans laquelle se fait le montage des anneaux, contient 28 vérins hydrauliques de 8 pouces (0,20 m.) de diamètre intérieur pouvant développer chacun, avec de l'eau à la pression de 2 t. par pouce carré (315 kg. par c. m²), un effort de 100 t. (101 605 kg.), soit en tout 2 800 t. (2 844 924 kg.). Mais on dut parfois pousser la pression jusqu'à 2 t. 3/4 par pouce carré (430 kg. par c. m²), et développer un effort total de 4 000 t. (4 064,200 kg.). Ces vérins ont d'ailleurs permis de diriger le bouclier avec une grande précision. Le plus fort écart a été de 2 pouces (0,05 m.). Ces vérins étaient réunis au point de vue de la mise en marche en quatre groupes pouvant être actionnés séparément.

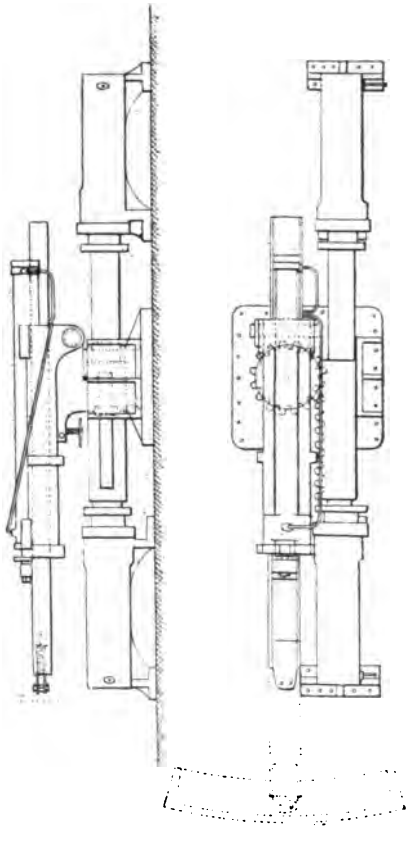


Fig. 224.
Grue de levage des segments.

La cloison arrière du bouclier (fig. 223, 224) portait deux grues pour le levage des segments ; leur axe était sur le diamètre horizontal et à 4 pieds de part et d'autre du diamètre vertical. Deux cylindres hydrauliques à simple action, mais fonctionnant en sens inverse, ont leurs pistons montés sur une tige commune ; cette tige porte une crémaillère qui actionne un pignon auquel est suspendue, par une charnière, une boîte en acier ; dans cette boîte une poutre, en H, peut glisser sous l'action d'un cylindre hydraulique de 4 pouces 1/2 (0,114 m.) de diamètre à double effet. A l'aide d'une manivelle, et d'une vis sans fin, on peut faire tourner la boîte d'acier et le bras de levage, autour de la charnière qui les relie au pignon, de manière à placer le bout du bras à la distance voulue du bouclier. Les vérins de cette grue

sont alimentés en eau à la pression de 1 000 livres, et on peut monter un anneau en moins d'une heure.

Le bouclier fut entièrement construit à la surface, dans une sorte de cale sèche, ouverte à côté du puits 4, à l'emplacement de la fouille de la tranchée couverte. Lorsque le montage fut terminé, on ferma les bouts avec des planches de sapin de 4 pouces (0,10 m.) bien calfatées, on le lesta et le maintint sur une quille unie, à l'aide de deux grues de 5 t. Quand le puits fut terminé, on démonta son enveloppe sur une surface suffisante pour permettre le passage du bouclier qui pouvait flotter avec un tirant d'eau de 17 pieds (5,18 m.). Le puits et la cale furent remplis d'eau à une hauteur suffisante pour que le bouclier flottât. On amena le bouclier dans le puits avec des cabestans et on le fit descendre lentement en pompant l'eau. Cinq jours après le commencement des opérations, le bouclier reposait au fond du puits sur un berceau, formé de pièces de bois et de rails, bien en direction pour entrer dans le souterrain. Il pesait environ 2 200 t. (2 353 000 kg.), et on l'avait descendu à 50 pieds (15,24 m.) de profondeur. On monta alors les anneaux en fonte sur la face du puits opposée au sens de la marche et on prit point d'appui sur ces anneaux pour faire avancer à l'aide de ses vérins le bouclier sur des glissières en fonte.

Travail à l'air libre. — Les pièces, qui fermaient provisoirement l'entrée, furent enlevées une à une et remplacées par des sacs d'argile pour maintenir les terres (fig. 225).

A ce moment, le terrain était formé, en descendant du haut en bas, de 2 pieds (0,61 m.) de ballast qui avait déjà été en partie asséché par les travaux de la tranchée et d'argile sur presque toute la hauteur, sauf dans le bas où l'on trouvait environ 1 pied (0,30 m.) de sable. On attaqua le travail à l'air libre. On n'avait besoin que d'une petite galerie au sommet pour maintenir le ballast qui devait bientôt disparaître par suite de l'inclinaison de l'argile. Sur tout le reste de la surface, il n'entrait pas une pièce de bois.

Le premier anneau fut mis en place le 9 juin 1893. Comme le bouclier descendait avec une pente de 1/36 et que la surface de séparation de l'argile et du ballast était horizontale, ce dernier disparut graduellement ; mais en même temps la hauteur de sable

en bas alla en augmentant. Cependant le ballast créa d'assez sérieuses difficultés, même sur un certain parcours après qu'on l'eut échappé. Il semble que, sous l'effort du bouclier, la couche d'argile, quand elle était encore mince, se brisait et l'eau se faisait jour, soit à l'avancement, soit à l'arrière entre la queue du bouclier et le revêtement. Néanmoins, les pompes suffirent largement à l'épuisement.

Dans la première semaine d'août, il y avait cinquante anneaux posés, ce qui représentait une longueur de 125 pieds (38,10 m.). On observa à ce moment une légère déformation du couteau, dans

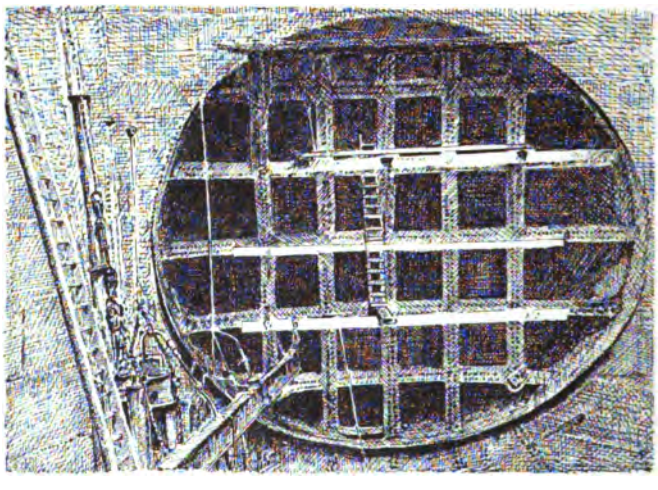


Fig. 225. — Démontage d'un tampon provisoire.

la cellule du bas et à gauche. Il est probable qu'il avait été faussé en le poussant contre un bloc de rocher, comme il s'en trouvait dans le calcaire coquiller qui forme la base de l'argile. Cette avarie ne paraissait cependant pas sérieuse et on continua l'avancement, en recommandant de bien dresser la fouille à sa dimension en face de la partie endommagée du couteau. Au milieu de septembre on avait posé en tout 77 anneaux et parcouru 192 pieds (58,52 m.); mais l'inflexion du couteau s'était beaucoup aggravée, sans doute sous l'effet du bourrelet de terre qu'il poussait devant lui quand la fouille était insuffisamment dressée. On ne pouvait songer à réparer le bouclier, là où il était, et il fallait à tout prix arriver

jusqu'au puits N° 3. Pour éviter l'aggravation du mal et réduire la résistance à l'avancement dans la région déformée, qui tendait toujours à dévier le bouclier, on fit une galerie boisée en avant du couteau, et on établit une fondation de béton de la forme exacte du bouclier, sur laquelle il pouvait glisser. On avait à ce moment environ 2 pieds (0,61 m.) de sable en bas et on pouvait avancer à raison de 5 pieds (1,52 m.) par journée de travail de vingt-quatre heures. Mais à mesure que l'on avançait, l'épaisseur du sable et la venue d'eau augmentaient. En approchant du puits 3, on reconnut que l'on était en relation directe avec lui, car la venue d'eau diminuait dans le souterrain, chaque fois qu'il se produisait un afflux d'eau et de sable dans le puits.

Le 16 décembre 1893, il y avait 191 anneaux de posés sur une longueur de 477 pieds (145,39 m.). Le sable montait environ jusqu'à l'axe et, depuis quelques jours, l'eau était devenue très gênante. On eut ce jour-là à subir une violente irruption d'eau et de sable dans la galerie menée en avant du bouclier, en face la partie déformée du couteau. En vingt-quatre heures, cette galerie fut pleine de sable ; on ferma et on boisa l'arrière du bouclier et on laissa pénétrer l'eau qui s'éleva à 15 pieds (4,56 m.), derrière le bouclier.

Il ne parut pas prudent de continuer dans ces conditions. Le bouclier n'était qu'à 67 pieds (20,42 m.) et la petite galerie à 37 pieds (11,28 m.) du caisson n° 3. Ce dernier était en cours de descente et on arrivait à 4 pieds (1,22 m.) du radier du souterrain. On avait eu beaucoup de peine à descendre ce caisson, le terrain était en mouvement et il y avait à craindre des accidents. On prit donc le parti d'arrêter provisoirement le souterrain et de s'installer pour reprendre le travail à l'air comprimé, dès que le fonçage du puits serait terminé.

Usine de compression. — On avait installé une usine très importante, comprenant des machines à vapeur et un grand nombre de compresseurs, sur la rive sud, à proximité des puits n°s 3 et 4. Cette usine pouvait développer environ 1 500 chev. de force ; mais on n'avait besoin ordinairement que de 1 000 à 1 200 chev. et on pouvait tenir une machine en réserve pour le cas d'avarie ou de

violentes pertes d'air. Dans ces conditions de marche normale, ces machines pouvaient fournir environ 8 000 pieds cubiques (225 m³) d'air à la minute.

Cet air était accumulé dans un réservoir cylindrique en tôles à chaudière de 28 pieds (8,53 m.) de longueur et 7 pieds (2,13 m.) de diamètre et refroidi avant sa distribution en le faisant passer dans une série de tubes plongés dans un courant d'eau froide et présentant une disposition analogue à un condenseur de surface. De là, l'air gagnait le souterrain dans des tuyaux, en passant par le puits n° 4.

Sas à air. — Les sas à air étaient encastrés dans des murs en briques construits en travers du souterrain. Comme ils avaient à

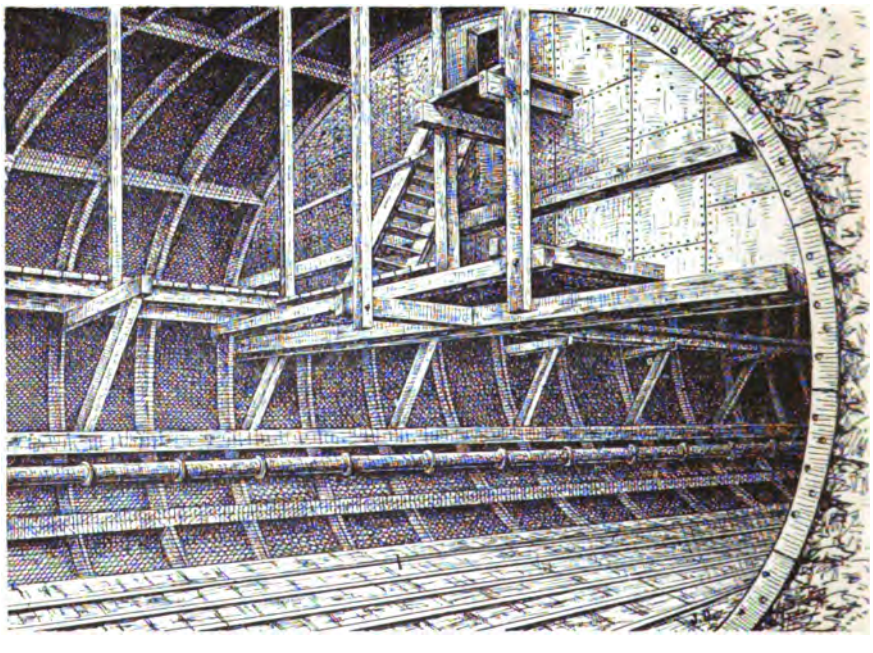


Fig. 226. — Ecran de sûreté.

supporter une pression d'environ 1 000 t. (1 016 048 kg.), on leur donnait une épaisseur de 12 pieds 6 pouces (3,81 m.). Dans ces cloisons étaient placés 3 sas à air.

Il y en avait deux en bas de 15 pieds (4,56 m.) de longueur et

7 pieds (2,13 m.) de diamètre, munis de portes de 5 pieds (1,52 m.) sur 4 (1,22 m.). Il y avait dans chacun de ces sas deux robinets de 1 pouce 1/2 (0,038 m.) de diamètre, placés aux deux extrémités, l'un pour l'admission et l'autre pour l'échappement de l'air. On avait également mis un robinet de 2 pouces 1/2 (0,053 m.) qui permettait d'écluser rapidement les wagons de déblai, que l'on pouvait y faire entrer deux par deux. Les wagons étaient ensuite remorqués par des câbles sans fin jusqu'au puits, où un ascenseur les montait au jour ; en arrivant en haut ils étaient pris dans un culbuteur qui les vidait.

Le troisième sas plus petit était placé en haut et ne devait servir que dans le cas où ceux d'en bas se trouveraient noyés par un afflux d'eau subite. On dut y recourir deux fois pendant que l'on construisait la partie sous la rivière.

Comme précaution, on avait en outre installé un pont en bois, qui conduisait du bouclier au sas de sûreté. A une centaine de pieds en arrière du bouclier, on installait (fig. 226) une cloison étanche qui descendait depuis le sommet jusqu'à environ mi-hauteur. Dans le cas où l'eau se serait subitement élevée, elle n'aurait pu envahir la cloche ainsi formée et barrer l'accès à l'écluse de sûreté. Cette cloison était munie tout à fait en haut d'une petite porte, que l'on aurait pu ouvrir momentanément pour le passage des ouvriers, si l'eau avait barré le passage par-dessous l'écran avant qu'ils l'aient atteint.

Cette organisation est digne d'attention et les accidents dont il a parlé déjà, ainsi que celui de Melbourne, ont prouvé qu'elle était dictée par la plus sage prudence.

Travail à l'air comprimé. — Le caisson n° 3 était à fond le 14 mars 1894 et le 23 mars, le souterrain fut mis en pression. On put reprendre le travail sans être gêné par l'eau ; la galerie fut dégagée du sable qui la remplissait et on constata que les boisages avaient peu souffert. La galerie fut poussée rapidement jusqu'au puits n° 3 ainsi que la fondation de béton, destinée à faciliter le glissement de la partie déformée du couteau. Le bouclier lui-même pénétra dans le puits en mai.

On perdit quatre mois à réparer le bouclier et à remplacer la

partie déchirée du couteau (fig. 227) par des pièces en fonte d'acier. Ce ne fut qu'en septembre que l'on put reprendre le travail. A la sortie du puits 3, comme d'ailleurs à l'entrée, on eut beaucoup de peine à maintenir étanche le joint entre le bouclier et le caisson et il se perdit beaucoup d'air à travers le terrain bouleversé par le fonçage (fig. 228).

Dès qu'on eut quitté le puits, le travail devint très régulier dans toute la partie du lit de la rivière où l'on était protégé par le banc

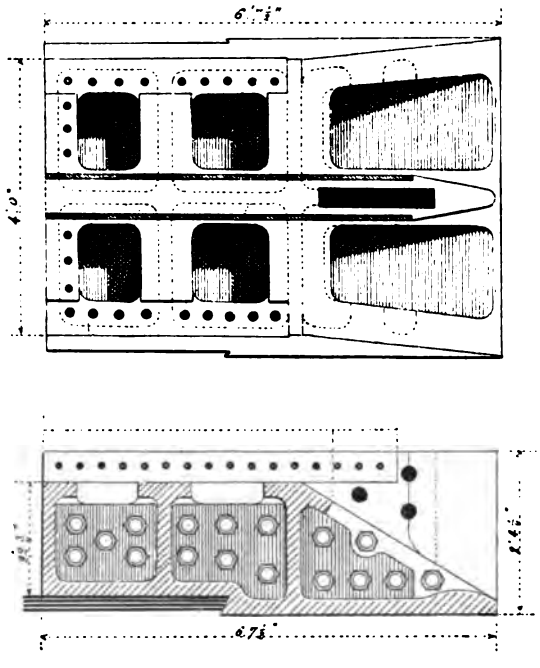


Fig. 227. — Détails du renforcement du couteau.

d'argile de Londres. Tant que le terrain était sec, il n'y avait pas besoin de fouiller en avant du couteau, il suffisait de faire une rigole pour permettre la pénétration du couteau ; le bouclier était assez fort pour fouiller le reste, beaucoup plus rapidement et avec une bien plus grande sécurité que si on avait fait la fouille avant d'avancer le bouclier.

Pendant plus de deux mois, on avança à raison de 252 pieds 6 pouces (76,96 m.) par mois et on fit jusqu'à 12 pieds 6 (3,81 m.) dans une journée de vingt-quatre heures.

Mais on savait par les sondages, qu'en approchant de la rive nord, le souterrain devait se trouver dans le ballast. On le rencontra au toit à 725 pieds (220,97 m.) de l'axe du puits n° 3. Aussitôt les pertes d'air devinrent importantes et il se produisit des bouillonnements à la surface. On ne put les éviter en glaisant l'attaque et le

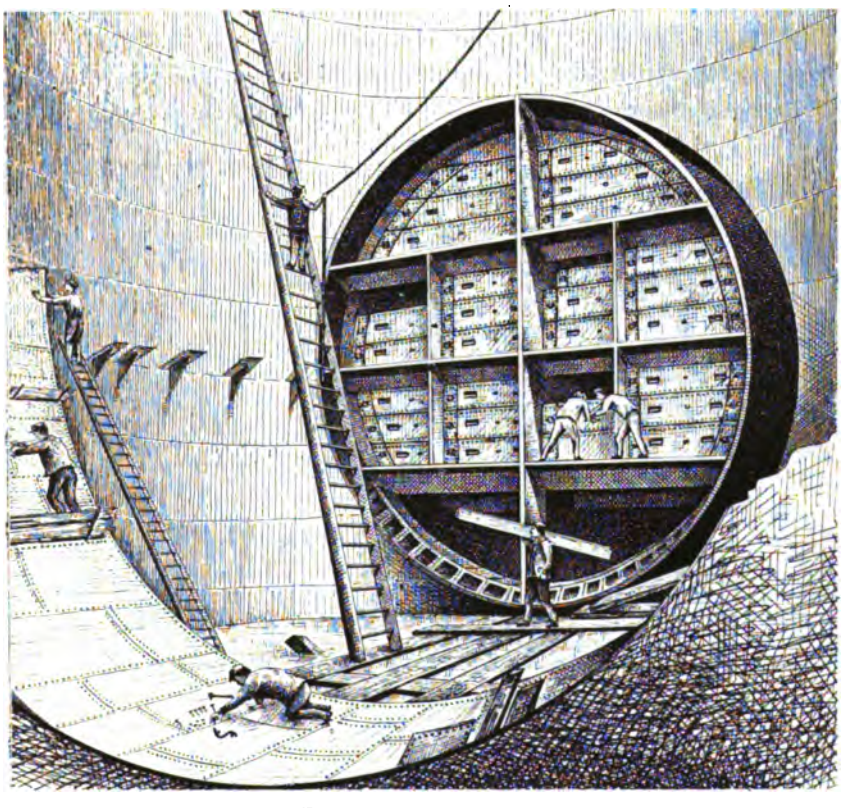


Fig. 228. — Entrée du bouclier dans le puits n° 3.

joint du bouclier et l'on dut arrêter pour blinder le front d'attaque et poser les volets mobiles dont il a été parlé (fig. 229).

Quand on avait, en déblayant, amené avec les vis ces volets jusqu'à l'aplomb du couteau, le bouclier était poussé en avant. On avait soin à ce moment de desserrer les écrous, de manière à permettre aux volets de reculer, à mesure que le bouclier avançait. Aussitôt que les volets arrivaient à fond de course, on déblayait le sable et le gravier qui s'étaient accumulés devant eux et on les

avançait avec les vis. On recommençait cette opération autant de fois qu'il était nécessaire jusqu'à ce que l'on eut parcouru 2 pieds 6 pouces (0,76 m.) et que l'on put poser un nouvel anneau du revêtement.

Pendant que l'on ôtait le gravier accumulé devant les volets, on avait de grosses pertes d'air. Il arrivait que pendant plusieurs jours, il fut impossible d'ouvrir les volets. Tout le déblai était sorti par de petites ouvertures de 3 pouces (0,076 m.) sur 7 (0,178 m.) ménagées dans les volets, que l'on pouvait rapidement fermer avec

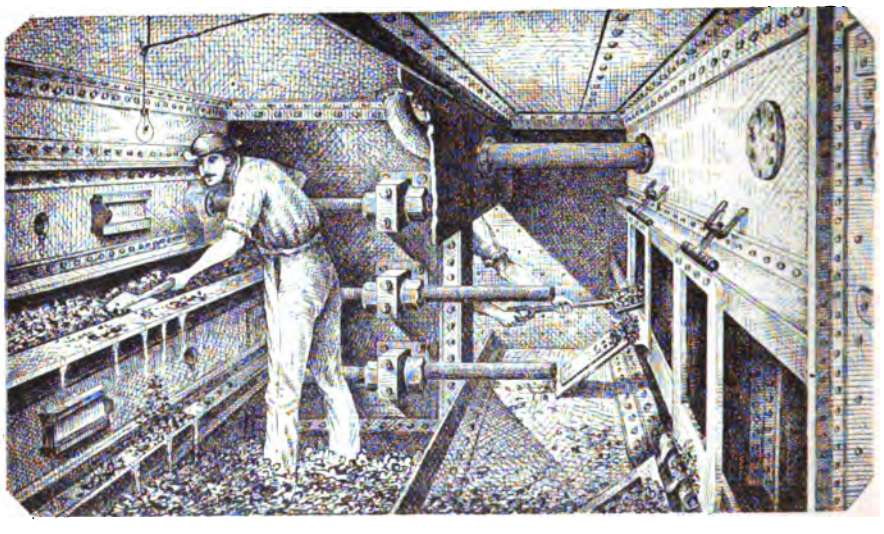


Fig. 229. — Emploi des volets de blindage.

une porte à coulisse. En ouvrant ces petites portes, les cailloux étaient projetés avec une telle violence, en même temps que l'air s'échappait, qu'ils produisaient des étincelles. En une semaine, on n'avança que de 5 pieds (1, 52 m.) ; mais, quand les ouvriers furent mieux habitués et que l'on eût élevé la pression dans les vérins, on arriva à faire 20 pieds (6,10 m.) par semaine et 65 pieds par mois (19,81 m.).

Le sommet de la fouille n'était qu'à 5 pieds 6 pouces (1,67 m.) du fond du lit de la rivière sur environ 150 pieds (45,62 m.) et, sur tout ce parcours, le déblai se composait de ballast pur. On fut obligé de déposer sur le fond de la rivière une couche d'argile de

150 pieds (45,62 m.) de largeur et 15 pieds (4,50 m.) d'épaisseur. Il est probable que, sans cette précaution, on n'aurait pu achever le travail. Car on trouvait souvent, dans le déblai, l'argile que l'on avait déposée, ce qui prouvait que tout le terrain naturel, qui séparait le travail de la rivière, avait été entraîné avec l'eau.

Quand on avait dépassé ce banc d'argile artificiel, on le draguait et on le reformait plus loin. Pendant l'exécution de toute cette partie du travail, on dut régler avec le plus grand soin la pression, suivant l'état de la marée. Le plus petit excès de pression aurait pu faire sauter le toit d'argile artificiel. En fait, cet accident se produisit deux fois ; dans une de ces explosions, l'eau de la rivière fut soulevée par l'échappement brusque de l'air à 25 pieds (7,62 m.) de hauteur sur une surface de 50 pieds (15,24 m.) de diamètre. Quand ces accidents se produisirent, le souterrain se remplit d'eau sur un tiers de sa hauteur, en moins de cinq minutes.

On s'efforçait de maintenir la pression de l'air égale à celle de l'eau au sommet du souterrain, afin de tâcher d'éviter les échappements d'air ; mais par contre on avait beaucoup d'eau dans la partie basse. Il aurait fallu tenir la pression plus élevée de 13 livres (0,8 kg.) pour maintenir le souterrain à sec, en raison de son diamètre. Il est d'ailleurs très difficile de dire quelle est exactement la charge d'eau, puisque l'air chasse l'eau du ballast et réduit sa hauteur et que l'air mélangé à l'eau la rend moins lourde.

On était parti de la rive sud le 16 septembre 1894, on atteignit le puits n° 2 sur la rive nord le 26 septembre 1895 ; on mit donc un an environ à traverser la rivière, malgré le temps perdu à placer les volets et malgré les glaces de février 1895, qui empêchèrent de recharger le banc d'argile, qui s'amincit dangereusement.

En mai 1896, on avait traversé le puits 2 et on se préparait à remonter la rampe d'accès vers Poplar East.

Conclusion. — Pour qui a suivi le récit de tous les travaux antérieurs, le souterrain de Blackwall paraît sans contredit une œuvre hors ligne, qui fait le plus grand honneur à tous ceux qui y ont pris part.

C'est le plus grand de tous les souterrains construits jusqu'ici, depuis Brunel, et le seul exemple d'un souterrain construit dans le

ballast sous une rivière et à la faible profondeur de 5 pieds 6 pouces (1,67 m.) au-dessous du fond du lit. Enfin c'est le seul grand souterrain construit à l'entreprise dans les couches aquifères. En un mot, c'est le plus difficile et le mieux réussi de tous les souterrains de ce genre.

Il est assez difficile de déterminer le prix exact de la partie en souterrain qui se trouve comprise dans le prix de 871 000 livres accepté par les entrepreneurs. Dans deux publications différentes, M. Binnie, ingénieur en chef, et M. Fitz Maurice, ingénieur résident, fixent le prix de revient à 550 livres et à 375 livres par yard; le premier de ces prix paraît s'appliquer à la traversée entre les puits 2 et 3 sous la Tamise et le second à l'ensemble.

Si l'on divise le forfait de 871 000 livres par la longueur de 6 200 pieds, on trouve un prix moyen, y compris les tranchées de 140 livres par pied ou de 420 livres par yard. Il y a donc beaucoup de chance pour que le prix donné par M. Binnie soit exact; il représente une dépense d'environ 15 000 fr. par mètre courant.

CHAPITRE X

SIPHONS DE CLICHY ET DE LA CONCORDE

I. — SIPHON DE CLICHY

(1892-1894)

Exposé. — Le siphon de Clichy est le premier tronçon de l'aqueduc destiné à conduire les eaux d'égout de Paris aux champs d'épandage d'Achères.

Cet ouvrage établit la communication entre l'usine élévatoire de la ville de Paris, sise à Clichy, sur la rive droite de la Seine et l'origine de la conduite libre en maçonnerie, qui, sur la rive gauche, conduit les eaux vers Achères.

Ce travail a été entrepris par M. Berlier pour la somme de 1 000 000 fr.

Plan et profil en long. — En plan (fig. 230), le siphon est en ligne droite dans la traversée de la Seine, puis, après avoir atteint la rive gauche, il s'infléchit à gauche par une courbe de 100 m. de rayon et de 42,07 m. de développement, de manière à suivre la rue Duchesnay, à Asnières, jusqu'à l'origine de l'ouvrage en maçonnerie à la rue du Château.

Le profil en long (fig. 231), comporte d'abord un puits d'où se détache la galerie franchissant la Seine. Cette dernière est en rampe de 0,06725 par mètre sur 240 m. puis en rampe de 0,07939 m. sur 222,87 m. La longueur totale depuis le puits jusqu'à l'extrémité est de 462,87 m.

La hauteur entre le niveau moyen des eaux et le point le plus bas de la galerie est de 17,00 m. et la distance entre le dessus de l'ou-

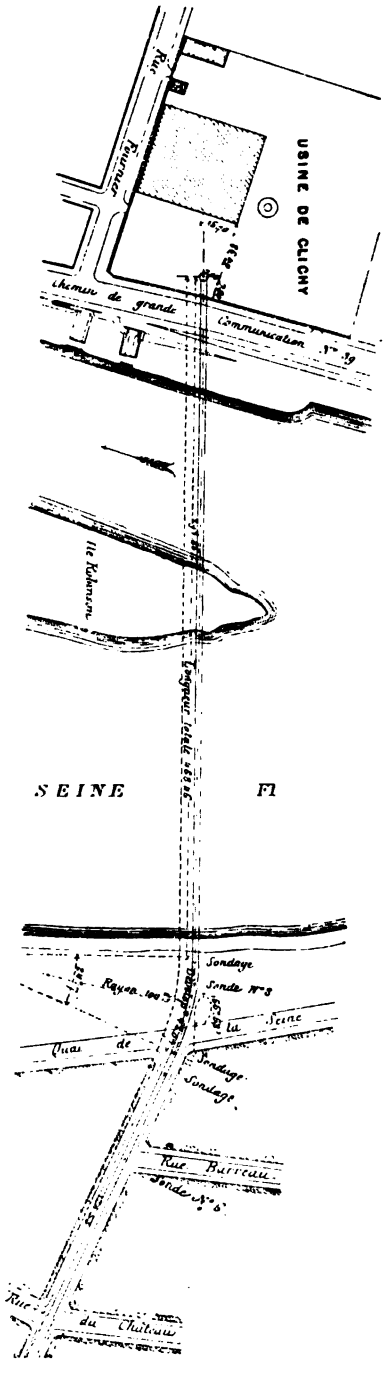


Fig. 230. — Plan général.

vrage et le fond du lit de la rivière est toujours au moins de 9,00 m. Les sondages avaient révélé la présence d'alluvions assez irrégulières; et il parut donc prudent de s'enfoncer autant que possible pour atteindre les marnes du calcaire grossier.

Dimensions de l'ouvrage. — Les anneaux de fonte (fig. 232) du puits sont d'une seule pièce; ils ont un diamètre extérieur de 3,515 m. et un diamètre intérieur de 3,18 m. entre nervures. L'épaisseur de la fonte dans le corps des anneaux, comme dans les nervures, est de 0,03 m. En outre, 20 renforcements relient ces nervures à la partie annulaire. L'assemblage de deux anneaux consécutifs est obtenu au moyen de 40 boulons de 0,26 m. de diamètre. Chaque anneau a 1,00 m. de hauteur et porte des bossages percés et taraudés pour l'injection de ciment. Au raccordement avec la galerie, il a été employé deux anneaux spéciaux formant ensemble une hauteur de 3,70 m. Les joints de ces anneaux ont été dressés au tour; ils ont été renforcés par une nervure horizontale et se composent chacun de deux morceaux réunis entre eux sur des nervures verticales par 10 boulons. Ces anneaux présentent du côté de la rivière une ouverture destinée à recevoir la pièce spéciale de raccord

avec la galerie et fermée pendant la descente du puits par un tampon en fonte. La partie inférieure du cuvelage formant trousse coupante est constituée par un cylindre en fonte de 60 mm. d'épaisseur et boulonnée aux anneaux. Son diamètre est un peu plus large, de manière à diminuer le frottement.

La pièce de raccordement avec la galerie est en deux morceaux; sa forme arrière correspond à l'intersection des deux cylindres de la galerie et du puits; son avant, complètement cylindrique, forme le premier tronçon de la galerie.

Cette dernière est constituée par des anneaux en fonte de 0,50 m. de longueur, 2,50 m. de diamètre extérieur et 2,30 m. de diamètre intérieur divisés en 5 segments et une clef (fig. 233).

Les segments ont une épaisseur de 25 mm. et les nervures 12,5 cm. de hauteur et 25 mm. d'épaisseur (fig. 234). L'assemblage est fait avec des boulons de 25 mm. Les joints verticaux reçoivent une fourrure en bois tendre et les joints horizontaux sont garnis de ciment (fig. 234).

Pour faciliter l'écoulement des eaux, la galerie a été revêtue avec du béton qui remplit les alvéoles des segments entre nervures et d'un enduit qui la rend complètement lisse.

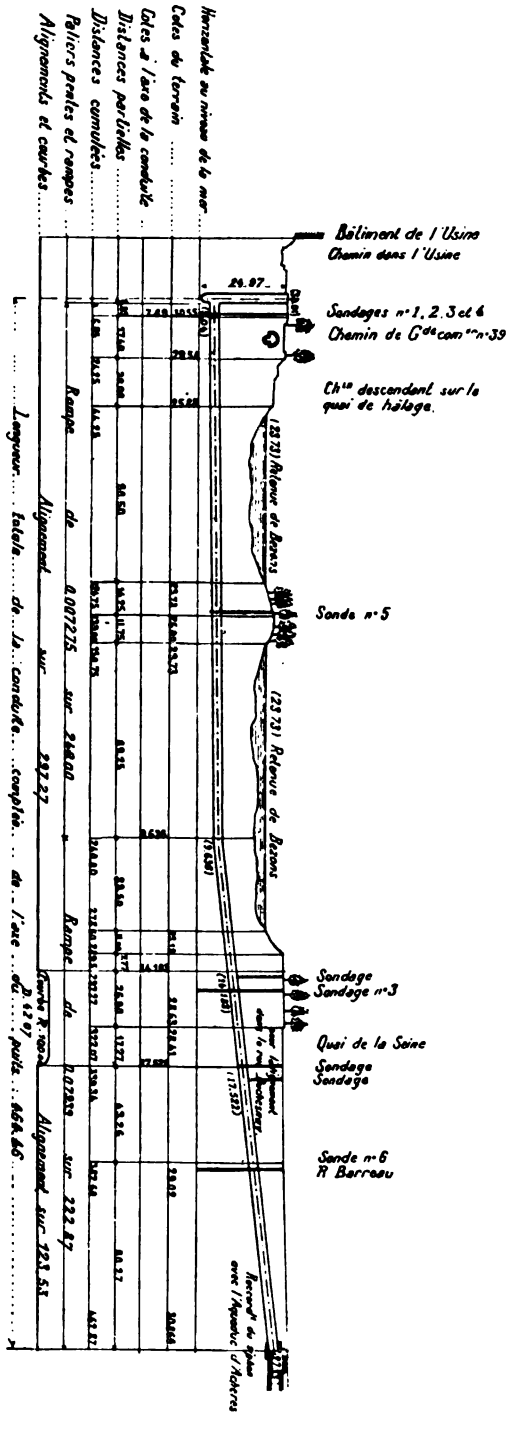
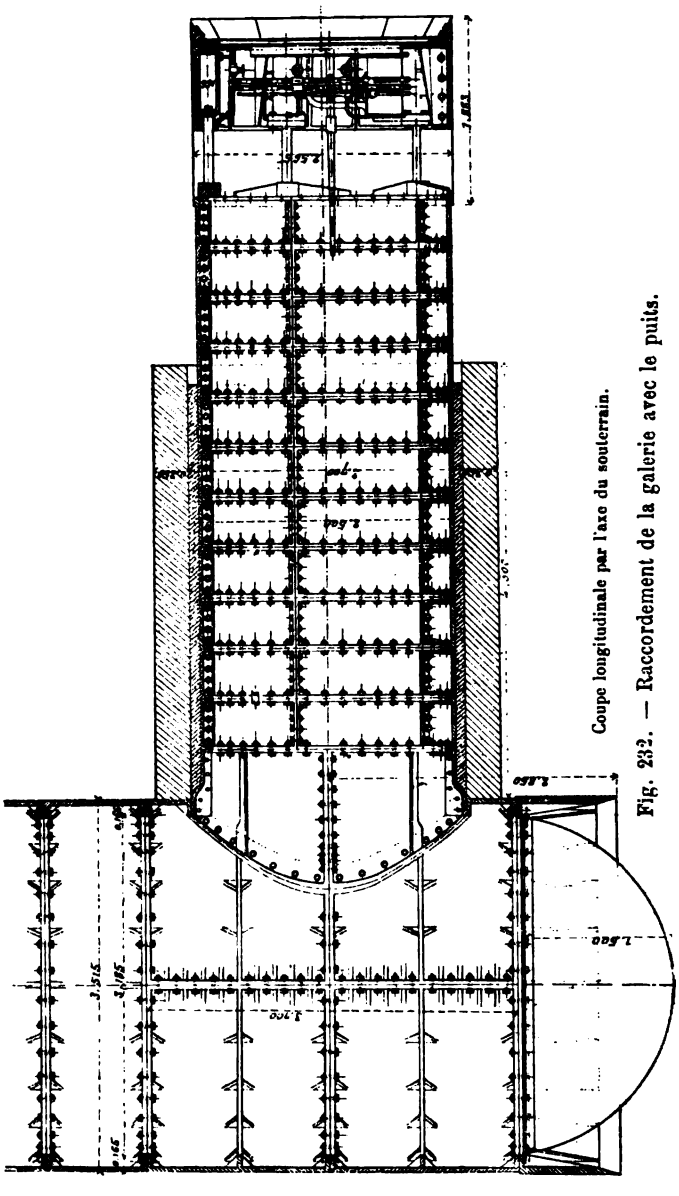


Fig. 231. — Profil en long.

Installations. — Il y avait à la surface des installations impor-



Coupe longitudinale par l'axe du souterrain.

Fig. 232. — Raccordement de la galerie avec le puits.

tantes, tant pour les manœuvres, levages et dragages que pour la production de l'air comprimé et de l'éclairage électrique.

L'appareil de levage était un pont roulant de 12 t. (fig. 235 à 237) installé au-dessus du puits, dont la portée entre appuis était de 7,50 m. et la hauteur libre sous poutres de 6,50 m. Ce pont était constitué par deux poutres en fer formant chemin de roulement

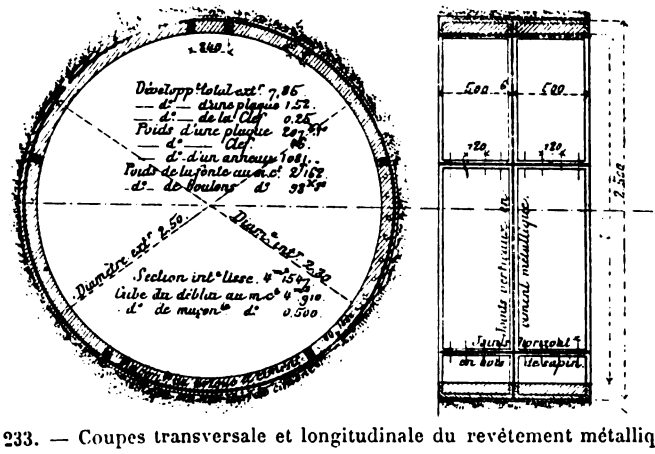


Fig. 233. — Coupes transversale et longitudinale du revêtement métallique.

supportées par des charpentes en bois de sapin. On pouvait ainsi amener aisément sous le pont les pièces de fonte du cuvelage et le bouclier. Il rendit de grands services pour la mise en place de la calotte du fond du puits, du cône de raccordement, des cheminées, du sas à air, et des engins d'épuisement et pour l'extraction des déblais.

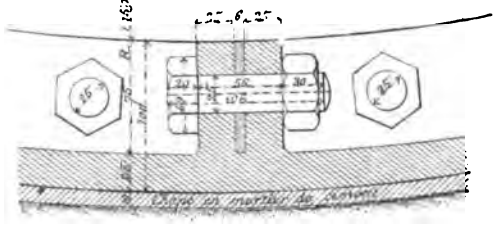


Fig. 234. — Détails d'un joint horizontal.

Sur la palée arrière (fig. 237) était un treuil à noix et à chaîne à deux vitesses, avec frein automatique Mégy. Une petite transmission, installée sur les deux contrefiches arrière et prenant son mouvement sur la transmission générale, permettait d'obtenir mécaniquement la translation du chariot.

La transmission générale installée sur le tréteau arrière du pont était mise en mouvement par l'une quelconque des machines et commandait, en outre du pont roulant, un petit compresseur pour

l'injection du mortier et la transmission intermédiaire de la dynamo

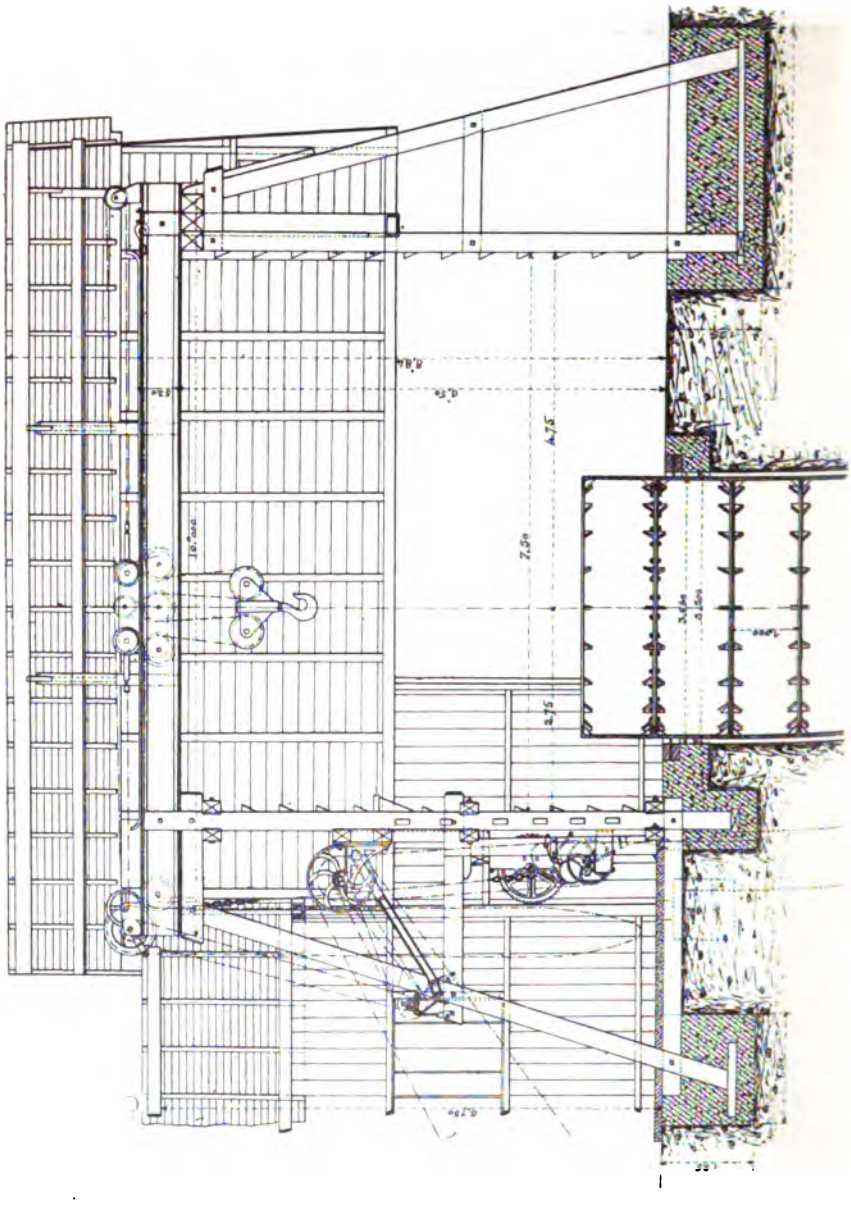


Fig. 238. — Coupe longitudinale de la charpente et des appareils de levage.

Gramme servant à l'éclairage. L'installation mécanique générale est représentée sur le plan (fig. 238). Il y avait deux machines

demi-fixes, une Weyher et Richemond K de 40 chev. et une Farcot J. de 25 chev. environ. C'est surtout la machine Weyher qui a fonctionné; la machine Farcot était plutôt employée, comme générateur pour les appareils d'épuisement Z, que pour la force motrice.

En outre de la transmission générale, la machine Weyher entraînait le compresseur H qu'elle commandait par courroie.

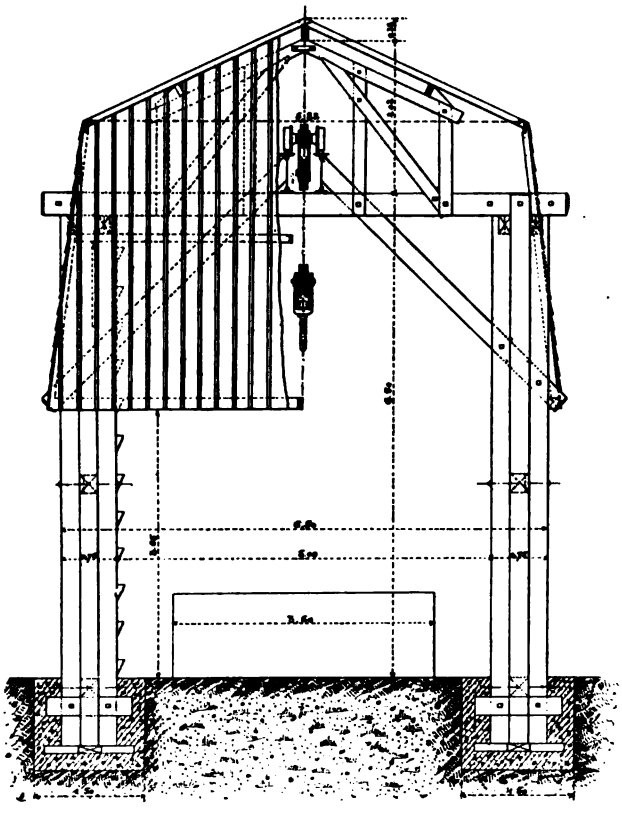


Fig. 236. — Vue par bout et demi-coupe de la charpente.

Le compresseur H eût été insuffisant pour débiter la quantité d'air nécessaire au travail. Deux autres compresseurs à action directe GG le complétaient. La vapeur nécessaire provenait d'une chaudière L, que des conditions locales avaient obligé à placer assez loin. Tous ces compresseurs étaient des Burton à circulation d'eau extérieure.

Toute la tuyauterie d'eau et de vapeur était installée de manière à pouvoir toujours suppléer un appareil par un autre, condition indispensable pour un travail qui devait se poursuivre jour et nuit sans arrêt, près de deux ans.

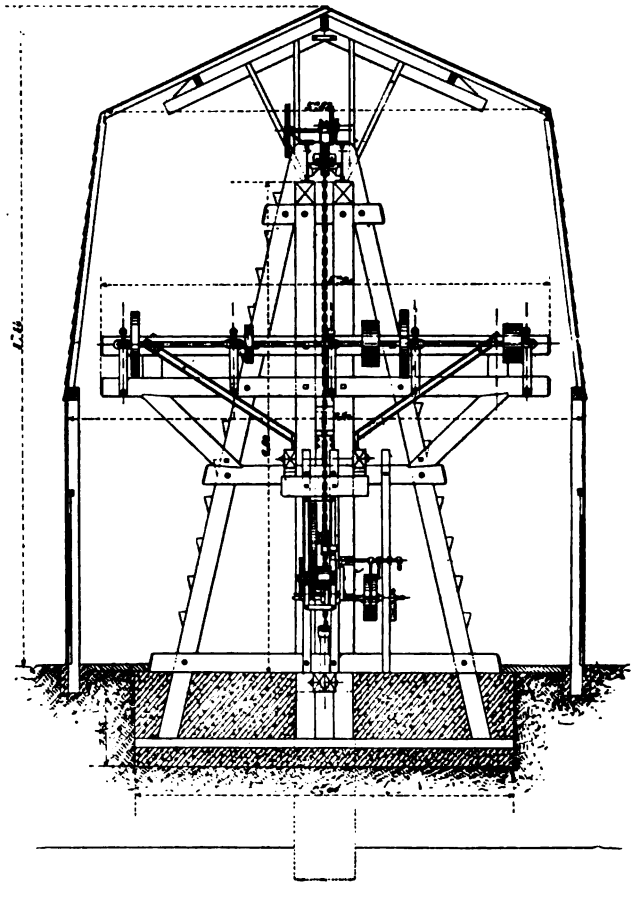


Fig. 237. — Treuil et transmission.

Fonçage du puits. — Le puits a été forcé en déblayant à l'intérieur du cuvelage, d'abord à sec, puis par épuisement, puis à la drague et enfin à l'air comprimé. L'installation pour ce dernier mode de forage est représenté par la figure 239 ; les déblais étaient montés par un petit treuil à vapeur installé à l'extérieur du sas à air (fig. 240). Au fur et à mesure du déblai, le cuvelage s'enfon-

En face la page 260.

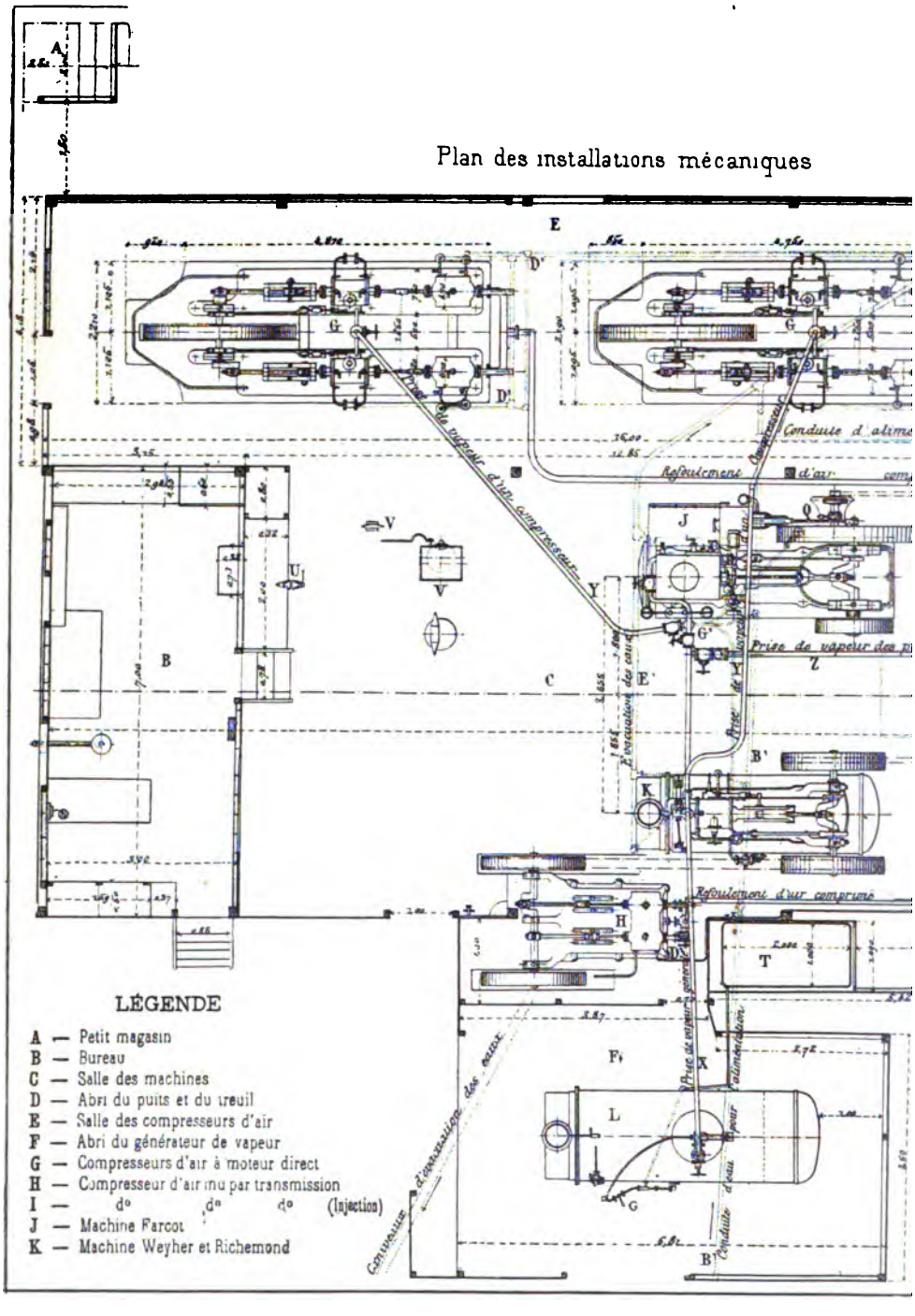
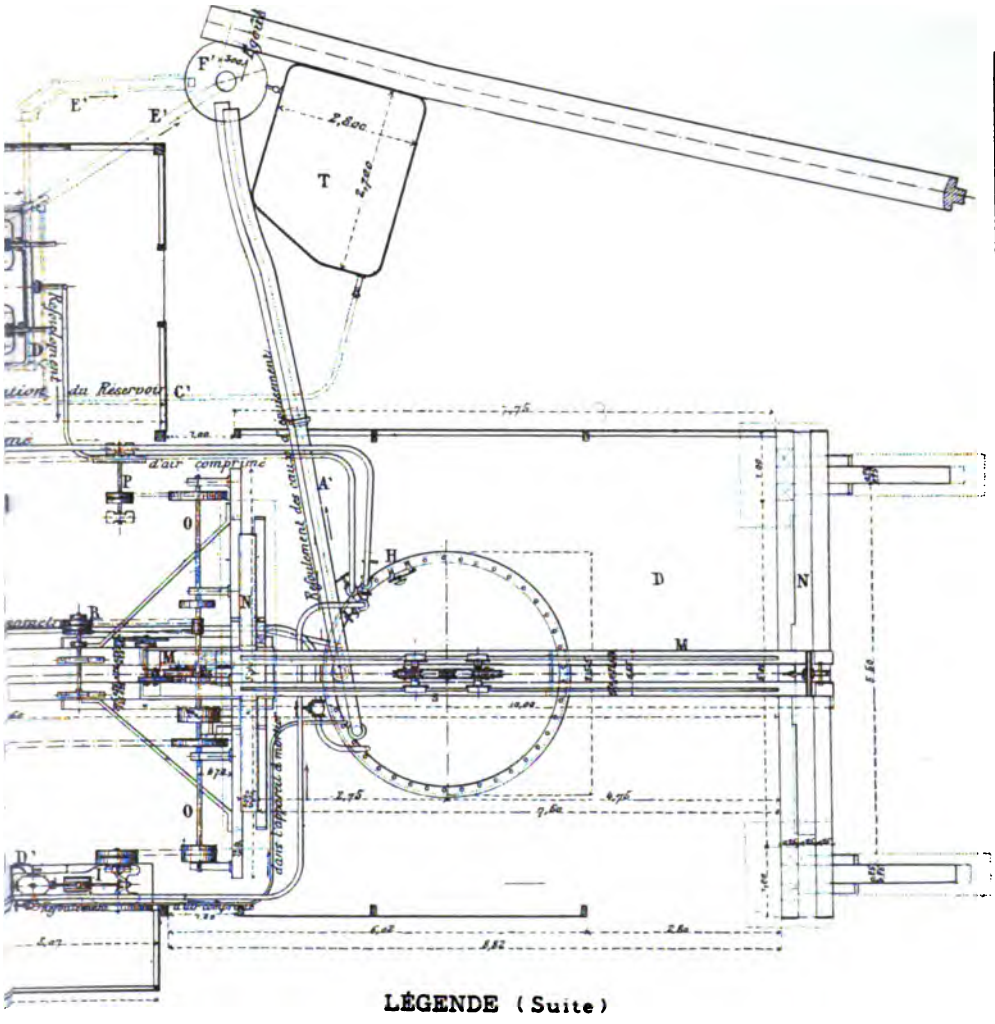


Fig. 238. — Plan d'



LÉGENDE (Suite)

L — Générateur de vapeur
M — Treuil et pont roulant
N — Charpente supportant le pont roulant
O — Arbre de transmission
P — Transmission intermédiaire
Q — Dynamo
R — Transmission pour la translation du chariot
S — Chariot
T — Réservoirs d'eau
U — Etabli et étau
V — Forge et enclume

X — Prise de vapeur générale
Y — d° des compresseurs
Z — d° des pulsomètres
A' — Refoulement des eaux d'épuisement
B' — Conduite d'eau pour l'alimentation
C' — Conduite d'alimentation du réservoir
D' — Circulation d'eau des compresseurs
E' — Evacuation des eaux
F' — Puisard conduisant les eaux à l'égout
G' — Injecteur pour alimentation des chaudières
H' — Timbre avertisseur

ensemble du chantier.

Baudry et Cie, Éditeurs, Paris.

çait et on ajoutait de nouveaux anneaux de fonte. Pour obtenir la

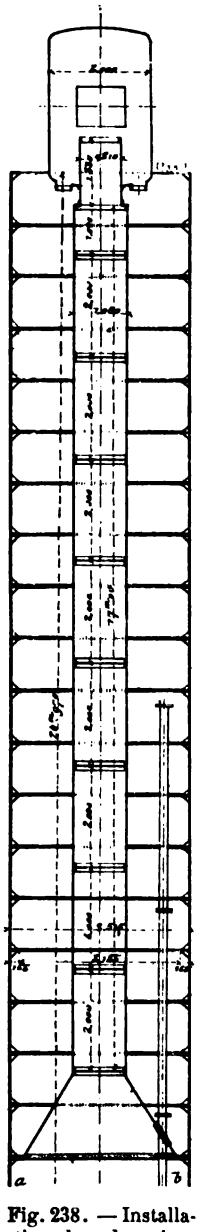


Fig. 238. — Installation dans le puits.

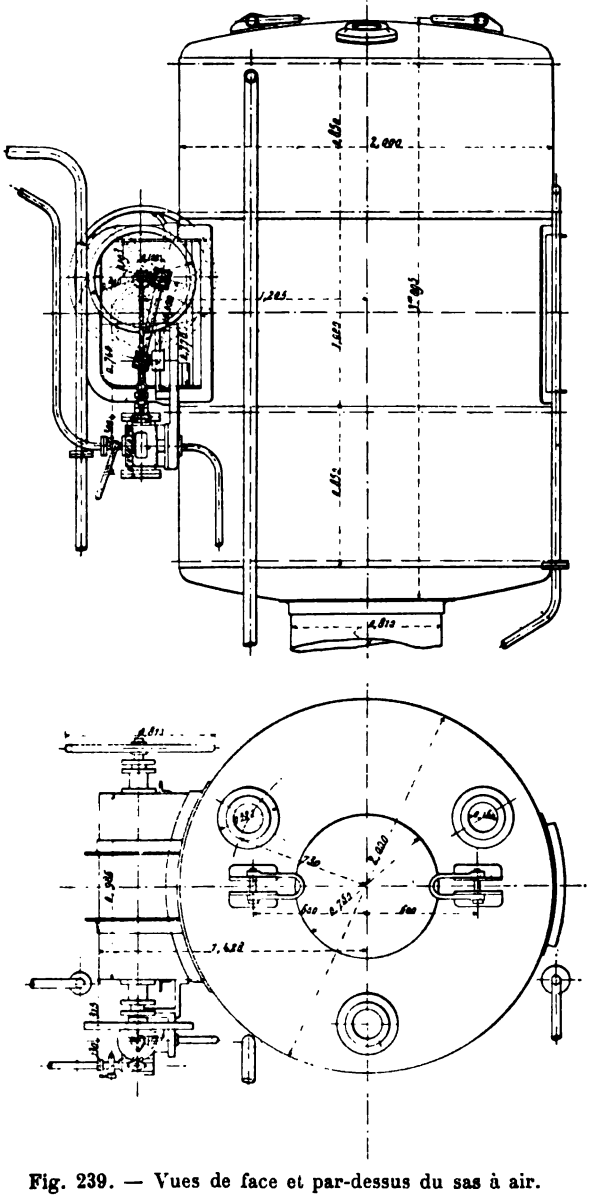


Fig. 239. — Vues de face et par-dessus du sas à air.

descente, on a dû charger le puits d'environ 200 tonnes en

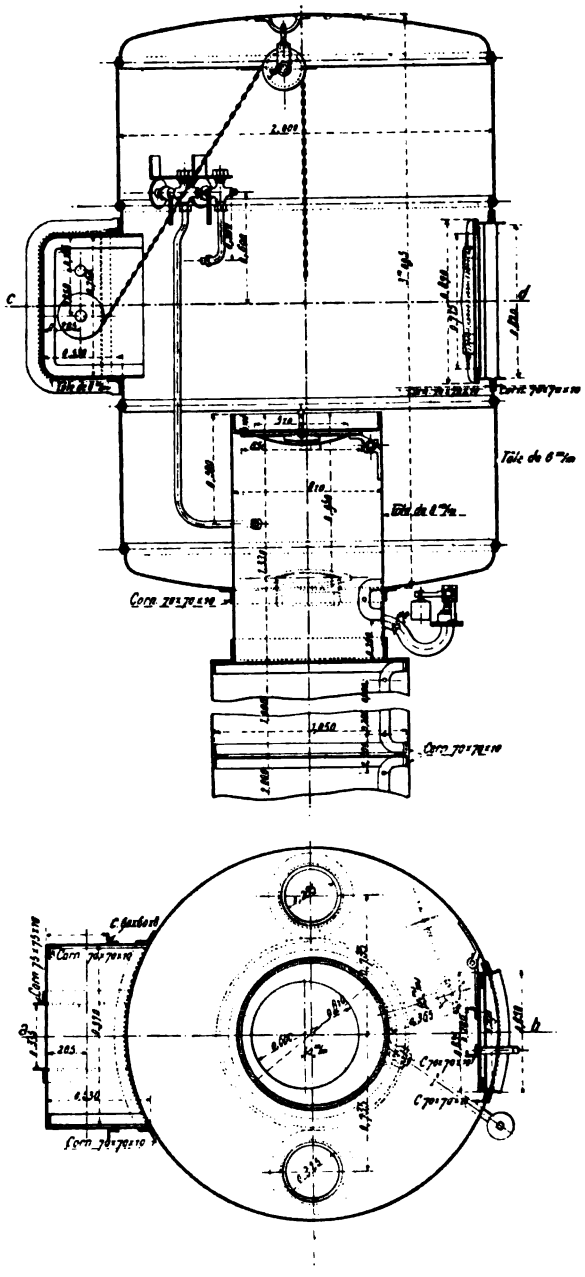


Fig. 240. — Coupes verticale et horizontale du sas à air.

employant le dispositif représenté par la figure 241. Malgré cette

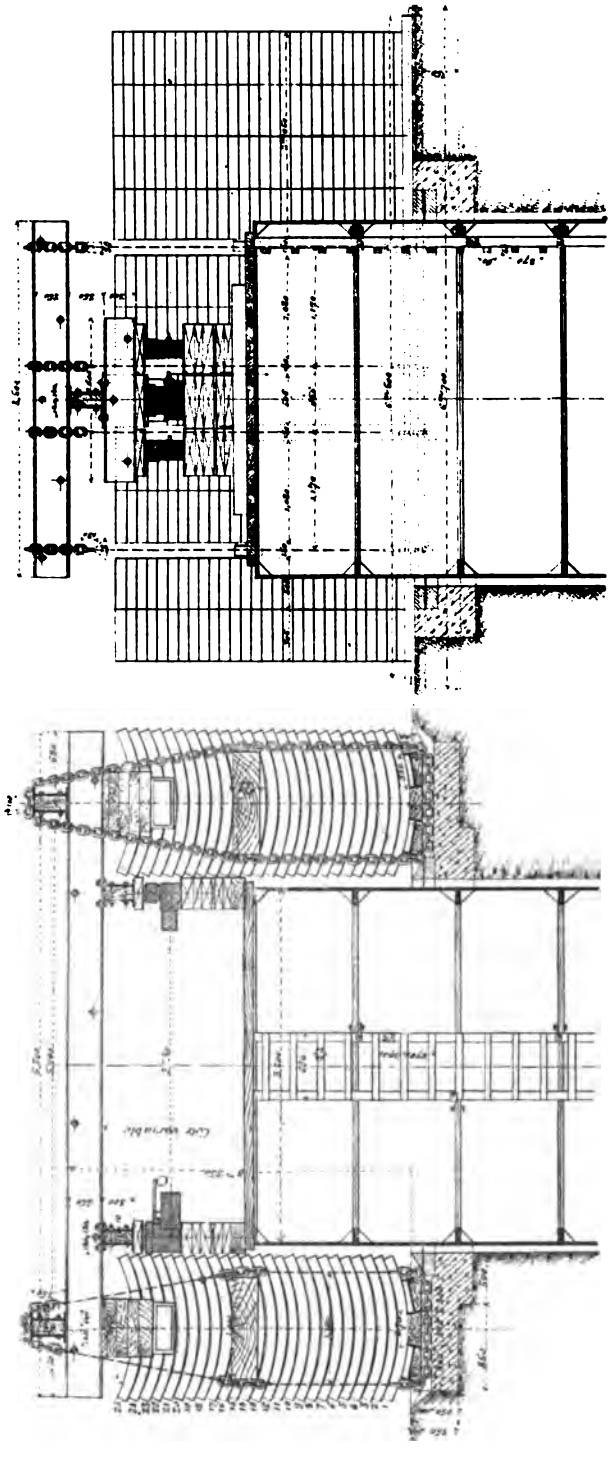


Fig. 241. — Disposition des charges pour le fonçage du puits.

charge considérable, la descente était extrêmement lente et s'arrêtait parfois complètement. On faisait alors dans le fond des explosions de dynamite, qui, par la secousse produite, facilitaient le mouvement de fonçage.

On traversa successivement des alluvions récentes sur 6.63 m., des alluvions sableuses anciennes sur 7,06 m., les marnes de Saint-Ouen remaniées sur 1,29 m., les sables bleuâtres avec rognons de grès ou ciment calcaire du niveau de Beauchamp sur 3,26 m. et enfin les marnes avec bancs de roche du calcaire grossier sur 6,66 m. Le puits attaqué le 10 novembre 1892, à la cote 29,94 m., a été arrêté le 25 juillet 1893 à la cote 5,04 m., soit à 24,90 m. en huit mois de travail.

Les avancements mensuels ont été en :

Novembre	5,65 m.
Décembre	5,01 —
Janvier	2,03 —
Février	2.06 —
Mars	2.78 —
Avril	2,14 —
Mai	1,49 —
Juin	2,26 —
Juillet	1,48 —

Amorce de la galerie. — L'attaque de la galerie, ainsi que son raccordement avec le puits ont présenté de sérieuses difficultés. On avait espéré que les marnes du calcaire grossier seraient imperméables. Mais elles étaient fissurées et donnaient autant d'eau que les sables. Quand on les eut atteintes vers la cote 10, il arrivait par le fond du puits 200 m³ d'eau à l'heure. Dans ces conditions, on dut tout d'abord rendre étanche le fond du puits. On y parvint en y adaptant une calotte en tôle (fig. 242). Il fallut mettre en place au scaphandre cette pièce qui pesait

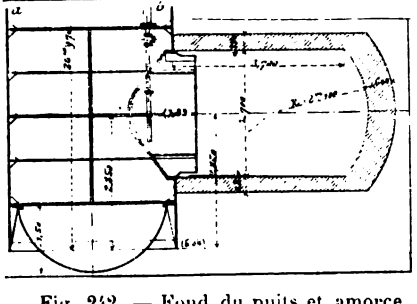


Fig. 242. — Fond du puits et amorce de la galerie.

3200 kg. et avait presque exactement la largeur du puits, et

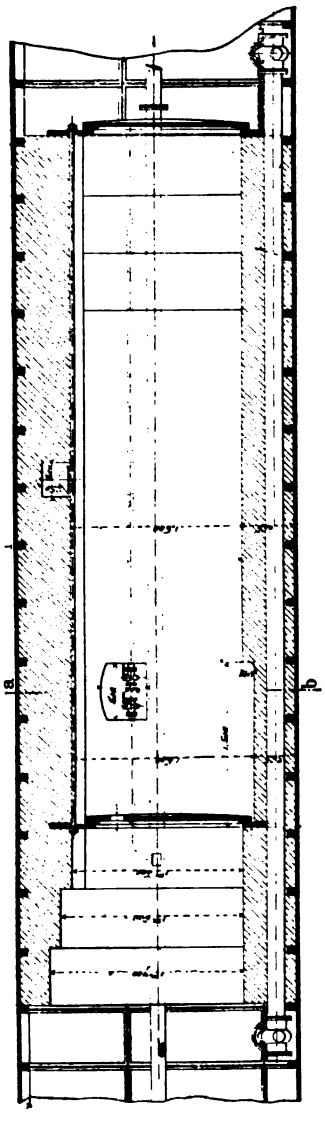


Fig. 243. — Coupe longitudinale du sas à air.

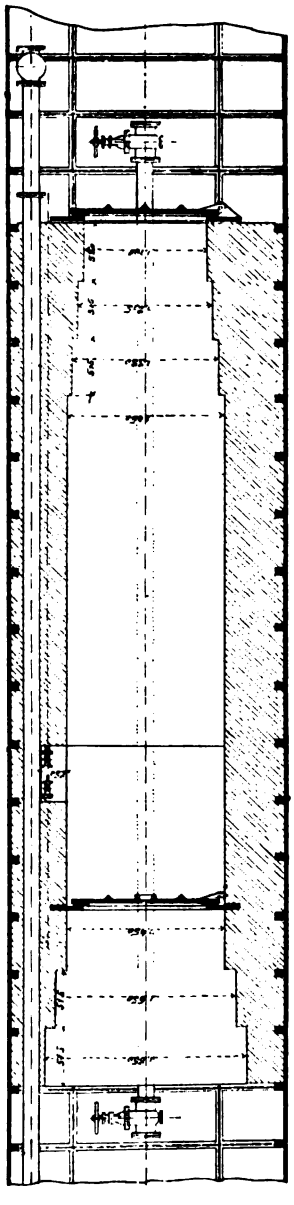


Fig. 244. — Coupe horizontale du sas à air.

l'assembler, sous l'eau, à la collerette de la trousse coupante, au moyen d'une fausse collerette composée de vingt segments et soixante boulons.

Quand cette calotte fut posée, on put épuiser à fond et installer le cône de raccordement, la cheminée et le sas destinés à permettre de commencer le travail à air comprimé. Dès que la pression eut été établie, on démonta la fausse plaque qui fermait l'orifice et l'on construisit une petite chambre en maçonnerie (fig. 242), de dimensions convenables pour recevoir le bouclier et suffisamment résistante pour rester étanche lorsque la pression serait lâchée. Ceci fait, on démonta le cône et les cheminées et on descendit en place le bouclier et les pièces de raccordement. On rétablit ensuite l'installation pour le travail à l'air comprimé, on démolit la calotte de fond de la chambre provisoire et on commença la galerie qui fut poursuivie avec le bouclier sur 50 m.

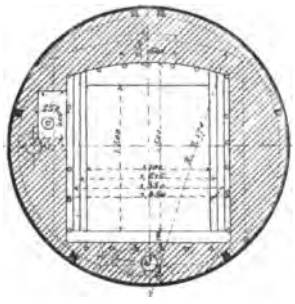


Fig. 245. — Coupe transversale du sas à air par *ab* de la figure 243.

Arrivé à cette distance, on installa dans la partie terminée, à 35 m. de l'origine, un sas à air de 6 m. de longueur en maçonnerie, fermé par des portes en fonte de 30 mm. d'épaisseur (fig. 243 à 245). On put alors démonter définitivement le cône et la cheminée et laisser à l'air libre le puits et l'amorce de la galerie jusqu'au sas à air.

Marche du travail. — Le travail régulier ne fut repris qu'en fin novembre. En décembre, l'avancement total fut assez régulièrement de 1,53 m. par jour, constamment dans les marnes et calcaires. En janvier 1894, on fit généralement 2,04 m. par jour, et parfois en traversant des veines de sable argileux on posa, en vingt-quatre heures, 5 anneaux représentant avec les joints une longueur de 2,55 m. Pendant la plus grande partie du mois de février, la marche fut analogue, mais le 23, à 175 m., on rencontra un pouddingue de blocs et de gravier qui ne permit de faire quelquefois que 0,51 m. par jour. Après avoir traversé ce terrain sur une dizaine de m., on retrouva le 6 mars les marnes et calcaires et l'avancement devint très régulier, généralement de 2,06 m. En avril, il en fut de même ; cependant quelques veines de sable permirent d'avancer de 2,56 m. en vingt-quatre heures.

En mai, dans la rampe, on atteignit les sables d'alluvions, l'avancement tomba à 1,03 m. et même à 0,52 m. Au milieu de juin, on traversa un lit de vase et d'argile où l'on faisait 2,06 par jour. En juillet enfin, dans les alluvions modernes argilo-sableuses, on fit presque constamment 2,56 m. et même à la fin 3,10 m. Le 3 août, on atteignait l'extrémité à 462,87 m. du puits.

Pendant tout ce temps, on travailla constamment à l'air comprimé avec une pression atteignant parfois 3 kg. Quoique l'on eût pas déplacé le sas, malgré les 3 000 joints du revêtement, les pertes d'air furent peu importantes.

Le bouclier. — Il y a peu de chose à dire du bouclier qui avait été construit en Angleterre, sur les dessins de M. Greathead, et qui n'est que la reproduction d'un type déjà souvent décrit.

II. — SIPHON DE LA CONCORDE

(1895-1896)

Exposé. — Le siphon de la Concorde fait partie du programme d'amélioration du réseau d'égouts de Paris, nécessité tout à la fois par l'accroissement de la population et du cube d'eaux usées et par l'installation du tout à l'égout.

Le travail a été, comme le précédent, confié à M. Berlier, qui s'était engagé à l'exécuter à forfait pour la somme de 475 000 francs par la méthode du bouclier.

Plan et profil en long. — En plan (fig. 246), le siphon suit une ligne droite sensiblement parallèle au pont de la Concorde et située à environ 40 m. en amont. Partant du quai d'Orsay, sur la rive gauche de la Seine, il aboutit sous la place de la Concorde au grand collecteur d'Asnières, au point où celui-ci reçoit le collecteur des quais de rive droite.

Le profil en long, (fig. 247) comporte d'abord une partie ver-

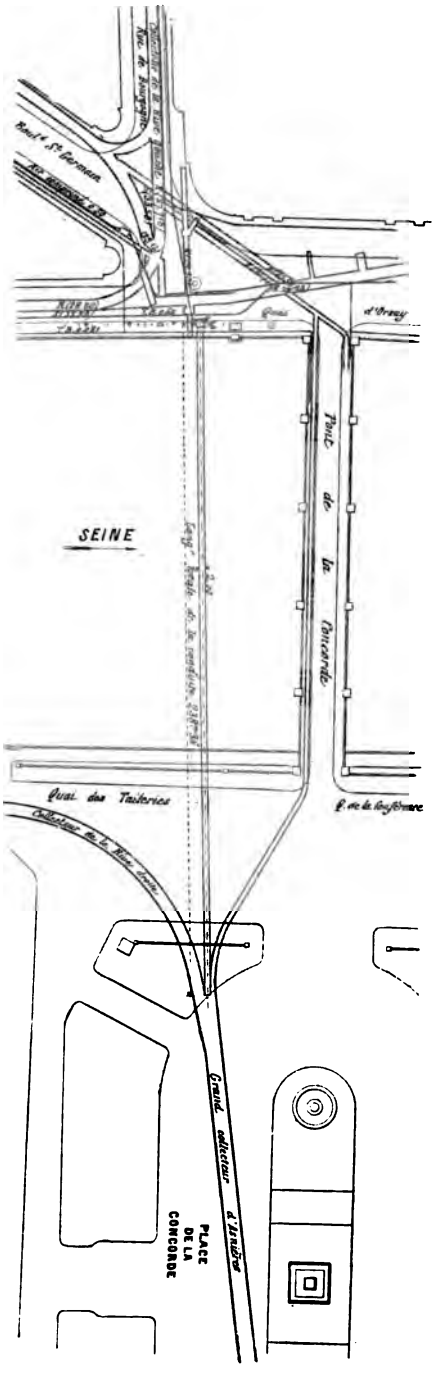


Fig. 246. — Plan général.

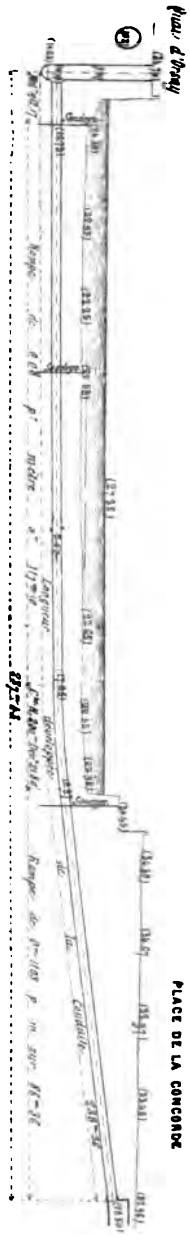


Fig. 247. — Profil en long.

ticale ou puits, d'où se détache à angle droit la galerie traversant la Seine. Après un palier de 12,17 m. de longueur, le souterrain est en rampe de 8 mm. par mètre sur 117,10 m., puis une courbe de 200 m. de rayon et de 21,80 m. de développement, raccorde cette première rampe avec une autre de 0,1103 m. par mètre sur 86,36 m. de longueur. La longueur totale développée, mesurée depuis l'axe du puits jusqu'à l'extrémité de la galerie, est de 238,36 m.

La hauteur entre le niveau moyen des eaux de la Seine (27,35 m.) et le point le plus bas de la galerie est d'environ 11,60 m. et la distance, entre le dessus de l'ouvrage et le fond du lit, est en moyenne de 4 m. et se réduit en certains points à 3,50 m. Les sondages avaient montré que l'on se trouverait dans les marnes et les roches fissurées du calcaire grossier.

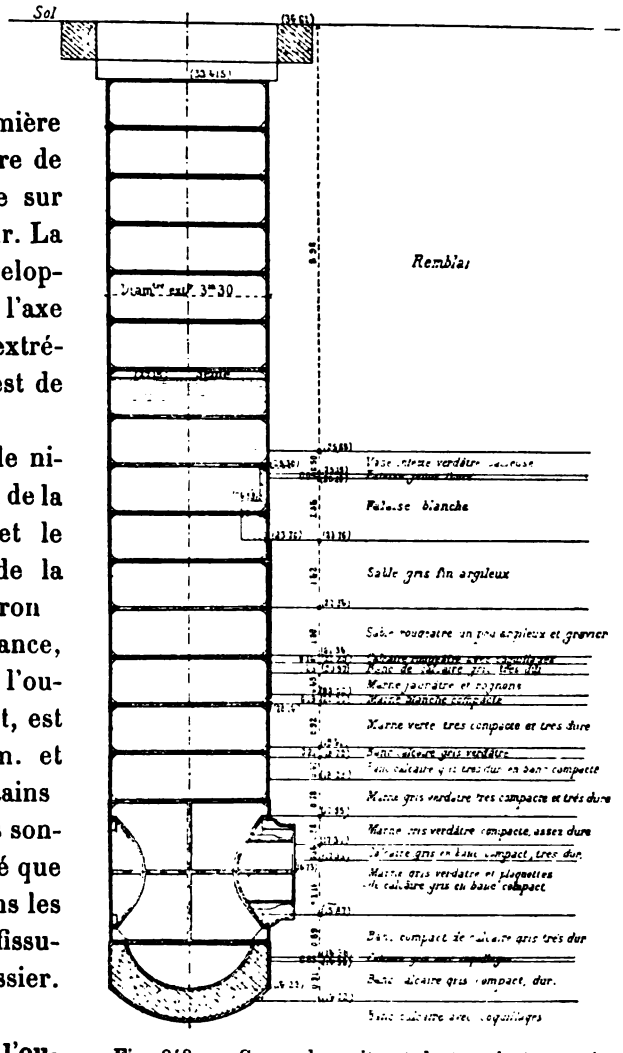


Fig. 248. — Coupe du puits et du terrain traversé.

Dimensions de l'ouvrage. — Les anneaux en fonte du puits (fig. 248), analogue à celui de Clichy, sont d'une seule pièce ; ils ont un diamètre extérieur de 3,28 m. et un diamètre intérieur entre nervures de 3 m. L'épaisseur de la fonte, dans le corps des anneaux comme dans les nervures, est de

0,03 m.; en outre, 20 renforcements relient ces nervures à la partie annulaire. L'assemblage de deux anneaux consécutifs est obtenu au moyen de 40 boulons de 26 mm. de diamètre, et les joints sont faits avec une corde spéciale caoutchoutée et du ciment de Portland. Chaque anneau à 1,00 m. de hauteur et porte 10 bossages percés et taraudés pour l'injection de ciment.

Au raccordement de la galerie, il a été employé deux anneaux spéciaux formant ensemble une hauteur de 3,00 m. Les joints de

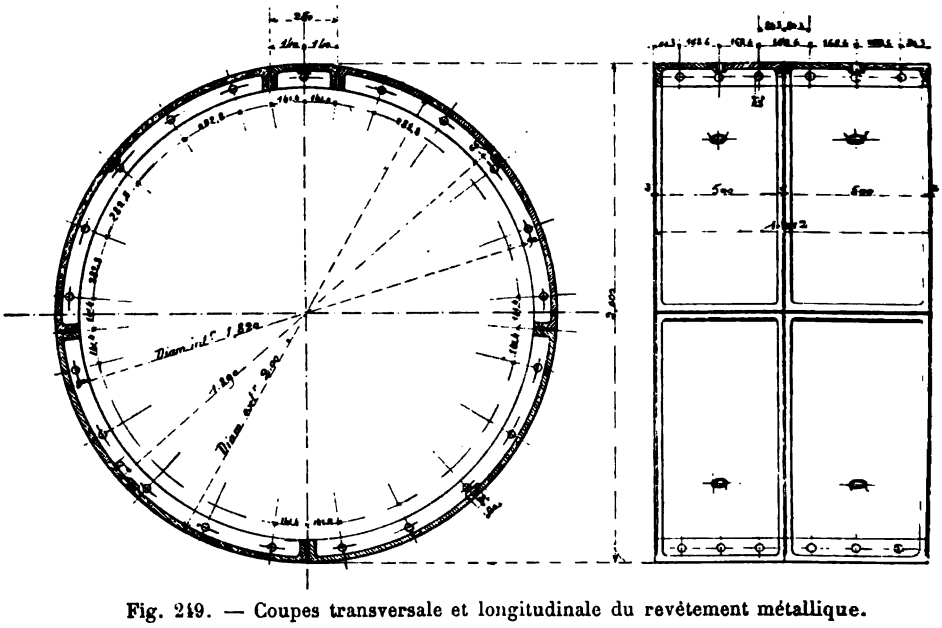


Fig. 249. — Coupes transversale et longitudinale du revêtement métallique.

ces anneaux ont été dressés au tour ; ils ont été renforcés par des nervures verticales et horizontales et présentent deux ouvertures symétriques, dont l'une, celle du côté de la Seine, a reçu la pièce spéciale de raccord avec la galerie ; l'autre est fermée par un tampon qui pourrait être enlevé dans le cas où il serait nécessaire de prolonger le siphon sous la rue de Bourgogne.

La partie inférieure du cuvelage, formant trousse coupante, est constituée par un cylindre en fonte de 60 mm., portant à la partie supérieure une large collerette en saillie de 0,30 m. de façon à servir d'appui à la voûte renversée du radier. Cette dernière dis-

position avait pour but d'éviter l'emploi de la calotte de fond que l'on avait eu tant de peine à placer à Clichy.

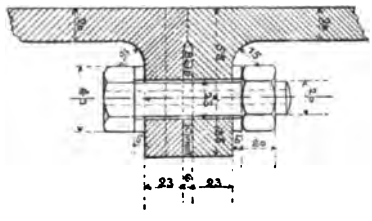


Fig. 250. — Détails d'un joint vertical.

La pièce de raccordement du puits avec la galerie est d'un seul morceau ; sa forme arrière répond à l'intersection des deux cylindres de la galerie et du puits ; son avant complètement cylindrique forme le premier tronçon de la galerie.

Cette galerie est constituée (fig. 249) par des anneaux en fonte de 0,50 m. de longueur, 2 m. de diamètre extérieur et 1,82 m. de diamètre intérieur, formés de 4 segments et d'une clef. Les segments ont une épaisseur de 20 mm. et les nervures 0,09 m. de

Fig. 251. — Vue perspective du revêtement métallique.

hauteur et 23 mm. d'épaisseur. L'assemblage (fig. 250) est fait avec des boulons de 20 mm. Le poids d'un anneau est de 666 kg. La figure 251 représente l'aspect de ces anneaux en place.

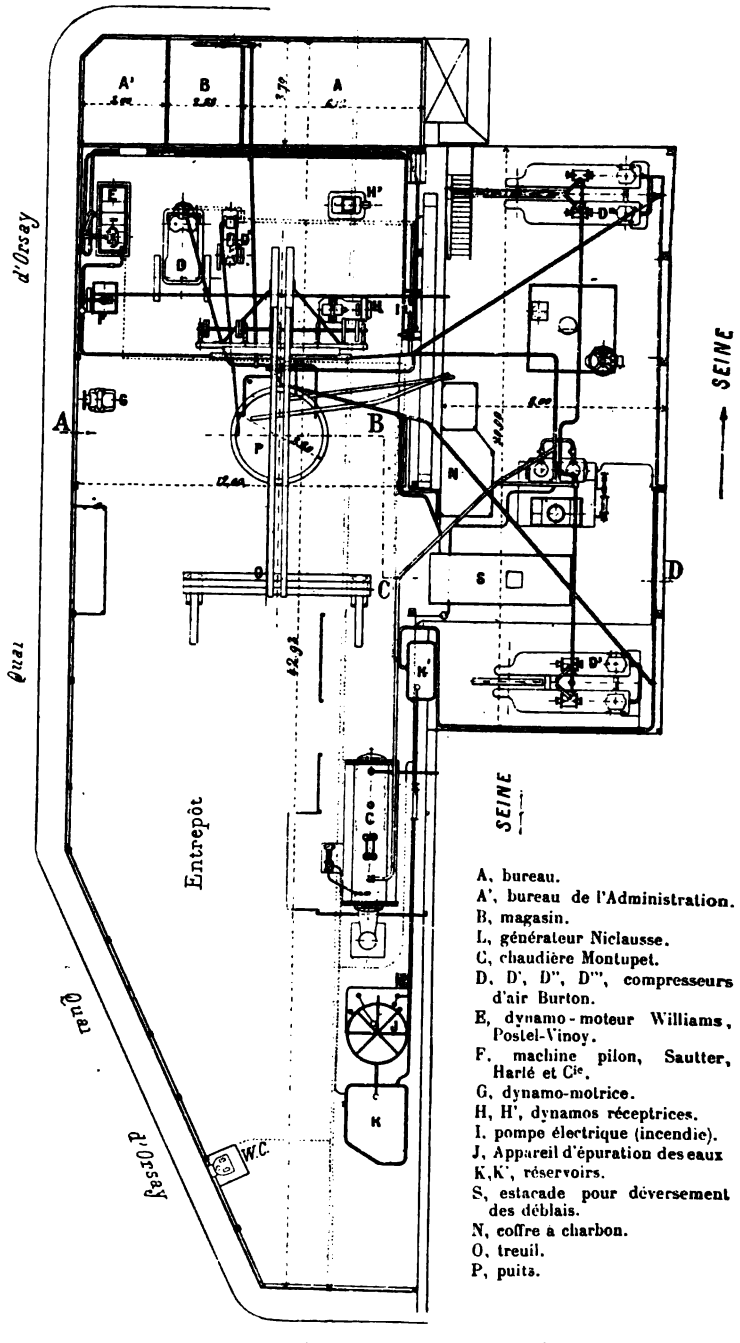


Fig. 252. — Plan général de l'installation.

Installations. — On ne disposait pour l'installation que d'un espace fort restreint sur le trottoir de 5 m. du quai d'Orsay, avec emprise de 7 m. sur la chaussée, soit en tout 12 m. de largeur. La surface totale était limitée à 430 m². Tous les déblais devaient être évacués par la rivière.

L'entrepreneur fut autorisé à établir sur la Seine une estacade de 20 m. de longueur et 8 m. de largeur. Le plancher de cette estacade reposait sur deux files de pieux espacés de 6 m. L'espace entre ces pieux devait rester libre pour le stationnement des

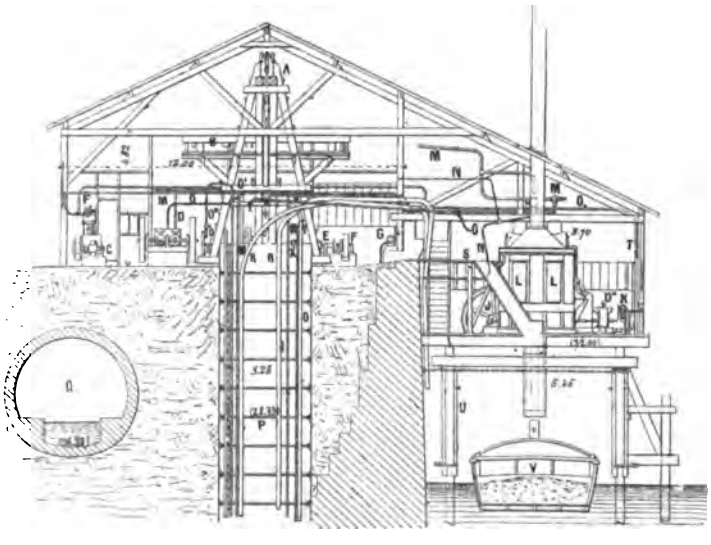


Fig. 253. — Coupe transversale du chantier sur ABCD du plan.

A, treuil et pont roulant.
B, arbre de transmission générale.
F, machine pilon Sautter, Harlé et Cie.
C, dynamo génératrice, —
E, dynamo réceptrice, —
G, pompe électrique (incendie).
D, D', D'', compresseurs d'air.
K, étau et établi.
MM, prises de vapeur.
N, —
OO', prises d'air comprimé.
Q, collecteur du quai d'Orsay.
R, refoulement des pulsomètres.
S, estacade pour l'évacuation des déblais.
T, prise d'eau.
U, estacade en Seine.
V, bateau de déblais.
X, porte-voix.
Y, timbre avertisseur.

bateaux destinés à recevoir les déblais ; on ne put donc les contreventer. Comme ils n'avaient qu'une très faible fiche de 3,50 m. dans la vase et qu'ils s'étaient arrêtés sur le calcaire grossier, il parut prudent de les amarrer au mur de quai par de fortes chaînes pour assurer la stabilité du plancher qui devait recevoir deux com-

presseurs tournant à grande vitesse. Le résultat fut satisfaisant.

Toute l'installation (fig. 252 et 253) fut placée sous un grand hangar couvrant le quai et l'estacade. L'outillage mécanique était pour la majeure partie celui qui avait servi à Clichy, sauf le remplacement des machines à vapeur par des moteurs électriques. On y retrouvait au-dessus du puits le pont roulant de 12 t. supporté par deux palées de 6,50 m. de hauteur. Deux groupes de machines indépendants l'un de l'autre produisaient l'électricité nécessaire pour l'éclairage et la force. Les connexions du tableau de distribution étaient disposées de manière qu'une quelconque des génératrices pût actionner indifféremment toutes les réceptrices.

L'un des groupes se composait d'une machine à vapeur F, à grande vitesse (450 tours) à la minute, à détente variable et échappement libre, actionnant par courroie une dynamo génératrice de 11 000 watts, à la tension de 120 volts. Le courant ainsi obtenu était employé en partie à l'éclairage comprenant 3 lampes à arc et environ 50 lampes à incandescence et en partie à la marche de l'électro-moteur du treuil. Elle pouvait développer normalement 6 à 7 chev. à la vitesse de 850 tours. Tout ce groupe avait été installé par la maison Sautter, Harlé et Cie.

L'autre groupe beaucoup plus puissant se composait d'une machine à vapeur Willans E actionnant directement une dynamo génératrice Postel Vinay, tournant à 520 tours et donnant normalement 25 000 watts sous une tension de 120 volts. La dynamo fournissait le courant à un moteur Rechniewski H pouvant développer en marche normale 18 chev. et actionnant l'arbre principal, qui commandait le treuil du pont, le petit compresseur d'air D''' à haute pression pour l'injection du mortier et le compresseur de 250 m³. D du même type. Ces deux compresseurs, ainsi que les compresseurs à action directe D' et D'' pouvant donner de 450 à 650 m³. d'air comprimé à l'heure à la vitesse de 110 tours, étaient ceux qui avaient déjà servi à Clichy.

Une autre réceptrice H', du même type que la précédente, actionnait une pompe centrifuge qui assurait normalement le fonctionnement du condenseur à jet d'eau de la machine Willans et pouvait servir en cas d'incendie.

L'installation primitive ne comprenait que deux générateurs

Niclausse L produisant normalement 750 kg. de vapeur à l'heure; mais on dut leur adjoindre une troisième chaudière C donnant 1 200 kg. de vapeur, qui fut installée sur le quai. A côté de cette chaudière se trouvait un réservoir K et un épurateur Howatson J.

Les épuisements furent assurés par deux gros pulsomètres installés en bas du puits et pouvant refouler 150 m³ d'eau à l'heure à 25 m. de hauteur. Sur l'estacade se trouvait le couloir de déchargement des bateaux et un petit atelier de réparation et d'entretien. Enfin l'installation était reliée, à titre de secours, à la canalisation de la Compagnie Parisienne de l'air comprimé.

Cette installation assez complexe fut faite rapidement. M. Berlier prit possession du terrain le 3 avril 1895 et donna le premier coup de pioche le 12 juin suivant.

Fonçage du puits. — On put exécuter la fouille à l'air libre jusqu'au niveau de l'eau à la cote 27. On mit alors en place la trousse coupante et le cuvelage de raccord avec la galerie. Pour éviter les difficultés rencontrées à Clichy, on installa de suite au-dessus de l'entrée de la galerie le cône de raccord avec la cheminée se terminant par le sas à air.

La mise en service de l'air comprimé eut lieu le 2 juillet, à la cote 25,65 m., dans une couche de vase verdâtre et sableuse (fig. 248). A la cote 25,30 m. on rencontra les assises inférieures du mur de quai, dont on atteignit la base à la cote 23,76 m. On entailla encore jusqu'à la cote 20,14 m. un des pieux qui portait cette fondation, et le 29 juillet la trousse reposait dans un banc de calcaire à la cote de 14,27 m.

Pour obtenir l'enfoncement, on chargea le puits d'abord de 100 t. de saumons, puis on dut remplir d'eau l'espace entre la cheminée et le cuvelage. Enfin, pendant la descente, on laissait tomber la pression. On assurait ainsi une surcharge qui atteignit, à la fin de l'opération, 220 t., ce qui correspond à une résistance d'environ 1 500 kg. par mètre carré de surface de frottement.

Afin de rendre le puits étanche, on exécuta au-dessous du couteau une fouille hémisphérique; on fit ensuite sur le terrain même un enduit en ciment de Portland très soigné sur lequel on coula le radier en béton de ciment que l'on recouvrit d'un nouvel enduit.

Amorce de la galerie. — On procéda alors au démontage du

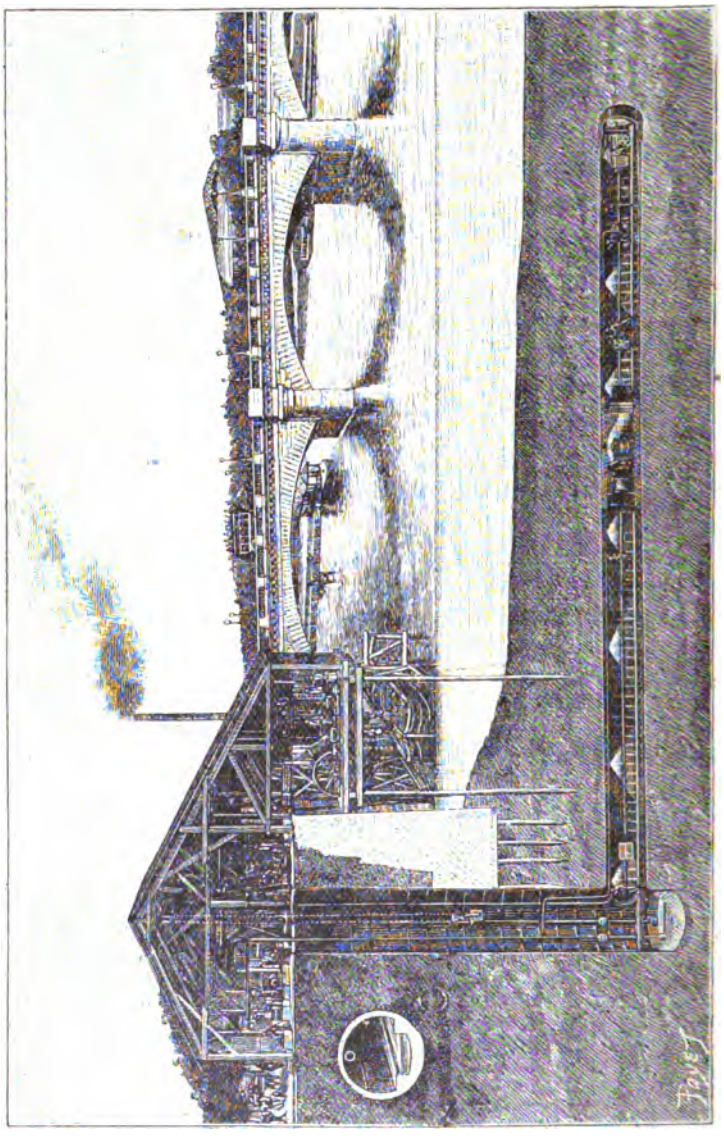


Fig. 254. — Vue générale de l'installation.

tampon qui fermait l'orifice du souterrain et on fouilla une chambre d'une longueur suffisante pour loger le bouclier et la pièce de raccordement du puits et de la galerie. Cette fouille fut consolidée

par un revêtement en briques, et au front de taille on boucha soigneusement les fissures du terrain.

On démonta ensuite le sas à air, la colonne et le cône de raccordement et on descendit le bouclier. Mais l'eau avait pénétré par les fissures du terrain et il se trouva noyé. On dut épuiser pour pouvoir l'entrer dans l'amorce. Il fallut faire de même pour la pièce de raccordement, et, après avoir également descendu les châssis de l'écluse que l'on devait construire ultérieurement dans la galerie, on rétablit l'installation d'air comprimé. Toutes ces manœuvres très délicates durèrent près d'un mois et ce n'est que le 25 août que l'on posa le premier anneau du revêtement.

Le travail d'avancement continua avec régularité jusqu'au 23 septembre, époque à laquelle la galerie atteignit 33,20 m. de longueur. Le faible avancement de 1 m. par jour en moyenne et au maximum de 1,50 m., tenait à ce que les déblais devaient être enlevés dans de petites bennes et passés par l'étroit sas à air établi au sommet du puits. On construisit alors à 15 m. du puits une écluse constituée par un blocage en maçonnerie appliqué contre les parois de la galerie et formant un couloir de 5,50 m. de longueur, 1,20 m. de hauteur et 0,80 m. de largeur. Cette écluse se fermait, suivant l'usage, au moyen de portes en fonte.

Dès que l'écluse eut été terminée et essayée, on put démonter définitivement le sas à air du puits et installer les pulsomètres destinés à relever l'eau de la galerie (fig. 254).

Marche du travail. — Le travail régulier fut repris le 25 octobre. On traversa jusqu'à 92 mètres de l'origine des bancs calcaires fissurés alternant avec des marnes verdâtres et grises. Ce terrain était très solide, mais l'eau s'écoulait par les fissures et on perdait beaucoup d'air qui s'échappait en bouillonnant dans la rivière. On devait parfois recourir à la mine dans le rocher. L'avancement maximum était de 6 m. et l'avancement moyen d'un peu moins de 2,50 m. On rencontra en ce point, le 23 novembre, un amas de blocs bouleversés qui causa d'abondantes rentrées d'eau et une consommation d'air qui atteignit 50 000 m³ par 24 heures. Les bouillonnements à la surface étaient très forts.

En approchant du quai, on traversa une marne très compacte. Le

profil remontant en pente rapide, on sortit des marnes et, quand

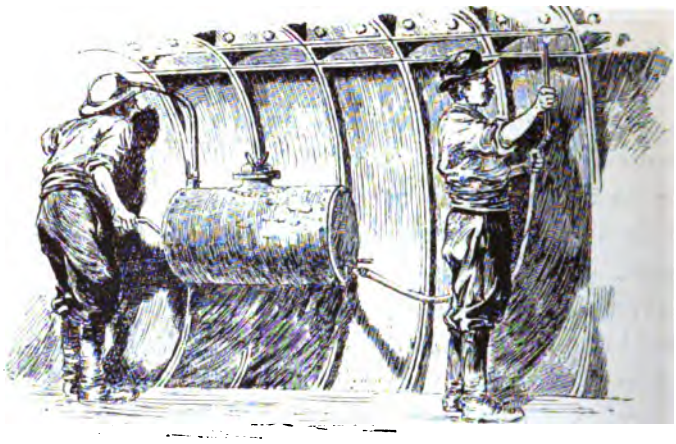


Fig. 255. — Exécution de l'injection.

on arriva au mur de quai rive droite, on coupa le pied de 5 pieux

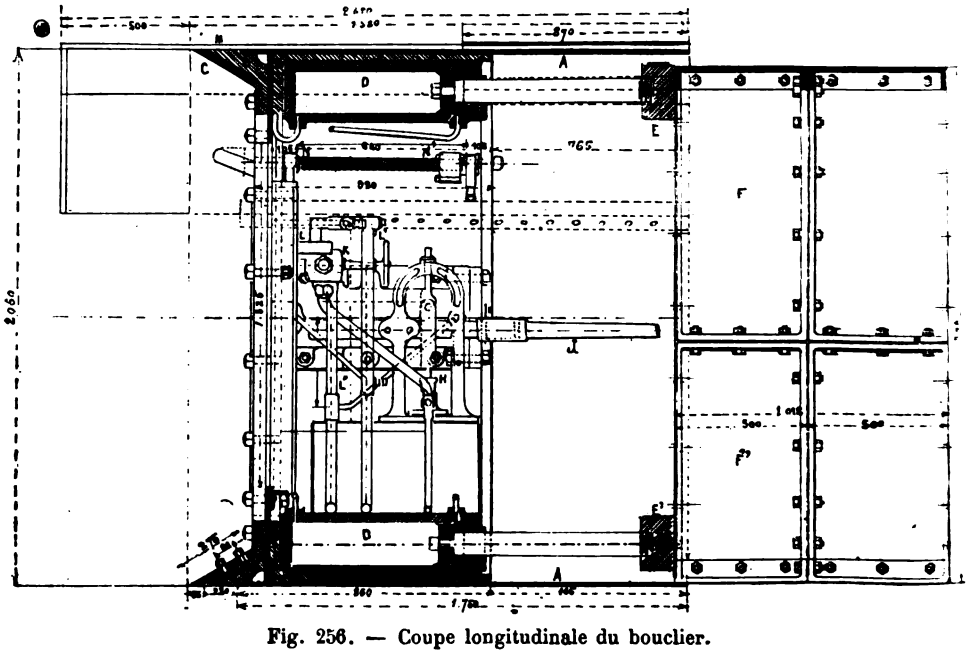


Fig. 256. — Coupe longitudinale du bouclier.

enfoncés dans le gravier d'alluvions mélangées de sables gris et bleuâtres. L'avancement moyen en décembre fut de 2,54 m.

Au commencement de janvier, on rencontra une couche de vase d'où se dégageait de l'acide sulfhydrique et qu'il fallut désinfecter, ainsi que de vieilles fondations. Le 31 janvier, on était à 224,40 m. du puits; on put arrêter les compresseurs et remettre la galerie à

Fig. 257. — Travail dans le bouclier.

l'air libre. Il ne restait plus qu'à faire le raccordement avec le collecteur d'Asnières et à exécuter le revêtement en maçonnerie.

En résumé, le fonçage du puits a demandé 47 jours et le percement de la galerie 111 jours, soit pour ce dernier travail un avancement journalier moyen de 2,15 m.

L'injection (fig. 255) s'est faite à l'aide de l'appareil Greathead. Le garnissage en béton de ciment avec enduit lisse n'a offert aucune particularité intéressante.

Le bouclier. — Le bouclier représenté en coupe par la figure 256 et en perspective par la figure 257 est du type déjà décrit des boucliers Greathead.

La seule originalité est d'avoir un parapluie M de protection pouvant se manœuvrer indépendamment du bouclier.

III. — RÉSUMÉ

On voit que ces deux siphons ont été exécutés dans des conditions très analogues à travers les terrains solides mais fissurés du calcaire grossier, qui n'offraient pas de grands dangers mais laissaient passer l'air et l'eau.

Ils ont été menés très énergiquement par M. Berlier et son collaborateur M. Amiot, chargé de la direction des travaux. Leur succès a eu un grand retentissement en France, où ils ont appelé l'attention sur l'avantage de la méthode. Leur prix de 2 054 fr. et 1 836 fr. par mètre courant paraît relativement élevé par rapport aux ouvrages anglais, mais il faut tenir compte de ce que l'entrepreneur courrait de gros risques en appliquant une méthode nouvelle, et aussi de ce que la fonte coûte infiniment plus cher en France qu'à l'étranger.

CHAPITRE XI

WATERLOO AND CITY RAILWAY

(1894-1897)

Exposé. — En 1892, le Parlement fut saisi de six bills pour la construction de chemins de fer électriques souterrains du système Greathead, analogues au City and South London Railway, en exploitation depuis 1890. La question parut si importante que les deux Chambres nommèrent une commission mixte. Les représentants du Conseil de Comté de Londres et de la Corporation de la Cité insistèrent vivement pour que les souterrains fussent ouverts à un diamètre suffisant pour permettre la circulation du matériel roulant des grandes lignes. On leur répondit que pour porter le diamètre à 16 pieds (4,88 m.) il faudrait dépenser 100 000 l. stg. (2 500 000 fr.) de plus par mile (1 550 000 fr. par kilomètre), et que d'ailleurs cette dépense serait faite en pure perte ; car l'intensité du trafic local ne permettait pas d'admettre les trains de grandes lignes en transit. L'opposition n'en fut pas moins vive; heureusement la commission se rendit compte qu'imposer une telle condition aurait eu pour conséquence d'empêcher la construction des nouvelles lignes, et elle passa outre.

Le général Hutchinson, ancien Inspecteur du Board of trade, aurait voulu que l'on imposât une condition encore plus extraordinaire. Il eût désiré que l'on exigeât, pour les souterrains sous la Tamise, deux enveloppes l'une dans l'autre « en vue d'une plus « grande solidité et afin que, si un train déraillait et brisait la pre- « mière enveloppe, l'enveloppe extérieure pût empêcher l'infiltra- « tion et l'invasion de l'eau dans la galerie ». On a beaucoup blâmé cette attitude des représentants de l'administration anglaise.

environ, les voies de garage, la station génératrice, machines, chaudières génératrices, etc. La traversée sous la gare de Waterloo, qui a nécessité la reprise en sous-œuvre des piles du viaduc portant la gare, est un travail délicat, mais ne présente rien de particulier.

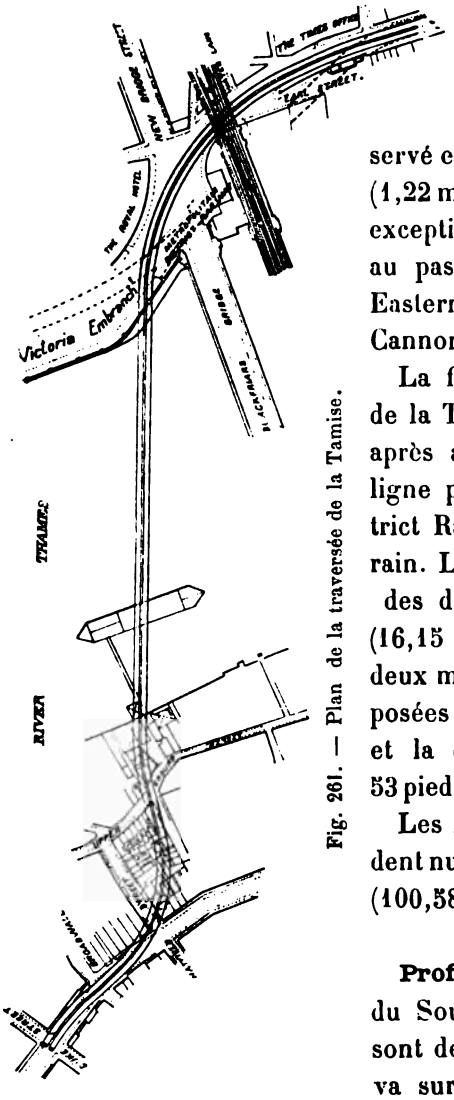


Fig. 261. — Plan de la traversée de la Tamise.

Généralement l'espace réservé entre les deux tubes est de 4 pieds (1,22 m.) ; cependant on a dû le réduire exceptionnellement à 2 pieds (0,61 m.) au passage sous la ligne du South-Eastern Railway, de Charing-Cross à Cannon-Street (fig. 260).

La figure 261 montre la traversée de la Tamise et des abords ; aussitôt après avoir touché la rive gauche, la ligne passe sous le Metropolitan District Railway qui est lui-même souterrain. La différence de niveau des rails des deux lignes est de 53 pieds (16,15 m.). Dans Queen's Street, les deux mêmes lignes se trouvent superposées sur une assez grande longueur, et la différence de niveau varie de 53 pieds (16,15 m.) à 45 pieds (13,72 m.).

Les rayons des courbes ne descendent nulle part au-dessous de 5 chaînes (100,58 m.).

Profil. — Aussitôt après le passage du South-Eastern où les deux lignes sont de niveau, on a donné à celle qui va sur la Cité une pente de 1/30 (0,033 m.), de façon à la faire descendre le plus rapidement possible dans l'argile de Londres, au-dessous des terrains aquifères. L'autre ligne n'a qu'une pente de 1/60 (0,017 m.). En arrivant sous la Tamise (fig. 262), les deux lignes sont au même niveau. Elles

remontent avec une rampe de 1/800 (0,00125 m.) jusqu'à l'entrée de Queen's Street en face des bureaux du *Times*, puis avec une rampe de 1/550 jusqu'à la station de la Cité.

Stations. — Il a déjà été parlé de la station de Waterloo. Celle de la Cité, en cours d'exécution, est sous Queen's Street et s'étend jusque près de Mansion House. Les quais ont 330 pieds (100,58 m.) de longueur. Cette station est précédée d'un croisement permettant le passage des trains d'une voie à l'autre. Elle doit être réunie par un plan incliné à la station du Central London sous la place de la Bourse. Cette dernière se composera d'une galerie, creusée sous la place et en faisant tout le tour, à laquelle on pourra accéder de chaque rue par des escaliers. Cette galerie, placée à petite profondeur, entoure un espace elliptique dans lequel se trouveront les puits avec ascenseurs destinés à desservir le Central London.

La construction de cette station sous le béton de fondation de la chaussée de la place de la Bourse, au cœur de la Cité, est des plus intéressantes.

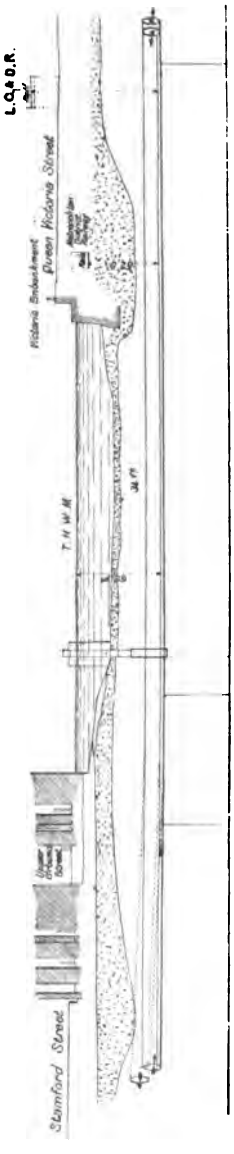


Fig. 262. — Profil en long de la Tamise.

Coupes en travers. — En voie courante, le souterrain comporte (fig. 263, 264) un anneau en fonte de 20 pouces (0,508 m.) de longueur, composé de 7 segments et d'une clef. Ces segments ont 7/8 pouce (0,022 m.) d'épaisseur et sont entourés de nervures de 1 pouce 1/4 (0,03 m.) d'épaisseur et de 5 pouces 1/8 (0,13 m.) de profondeur. Le diamètre extérieur est, entre la Tamise et la Cité, de 13 pieds (3,96 m.) et le diamètre intérieur de 12 pieds 1 pouce 3/4

(3,70 m.). Entre la Tamise et Waterloo, à cause des courbes de 5 chaînes (100,58 m.) de rayon, pour faciliter le passage du matériel dans les courbes, on a porté le diamètre extérieur à 13 pieds

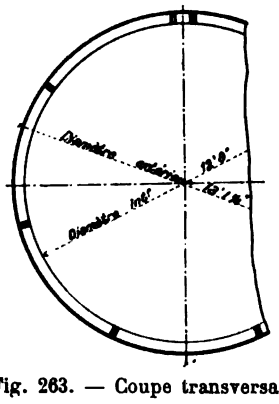


Fig. 263. — Coupe transversale.

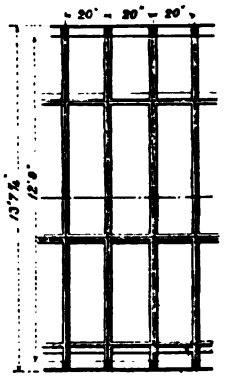


Fig. 264. — Coupe longitudinale.

Revêtement métallique.

7 pouces 1/4 (4,14 m.) et le diamètre intérieur à 12 pieds 9 pouces (3,88 m.). Chaque segment est fixé par 8 boulons dans les joints verticaux et 2 dans les joints horizontaux. Tous ces boulons ont 1 pouce (0,025 m.) de diamètre. Les joints horizontaux sont rabotés; les joints verticaux (fig. 265), ont une portée extérieure et reçoivent une fourrure en bois créosoté.

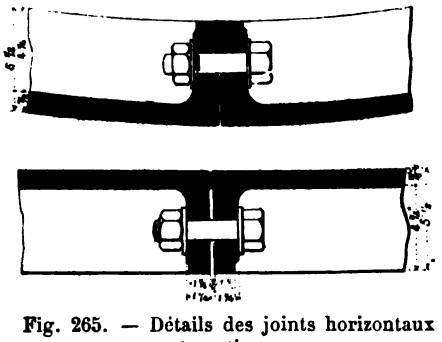


Fig. 265. — Détails des joints horizontaux et verticaux.

Le poids de chaque anneau est d'environ 1 t. 81 (1 839 kg.), pour la plus grande taille et de 1,73 t. (1 758 kg.) pour la plus petite.

On a installé pour les besoins du service des communications entre les deux galeries. Il y en a 6 du type de la figure 266 à intervalles réguliers.

Les figures 267 et 268 représentent une communication à un point où les deux galeries sont à des niveaux différents. On a renoncé à cette commodité partout où les souterrains avaient été ouverts dans les couches aquifères.

Les galeries une fois terminées, l'intérieur est, suivant l'usage, revêtu en béton.

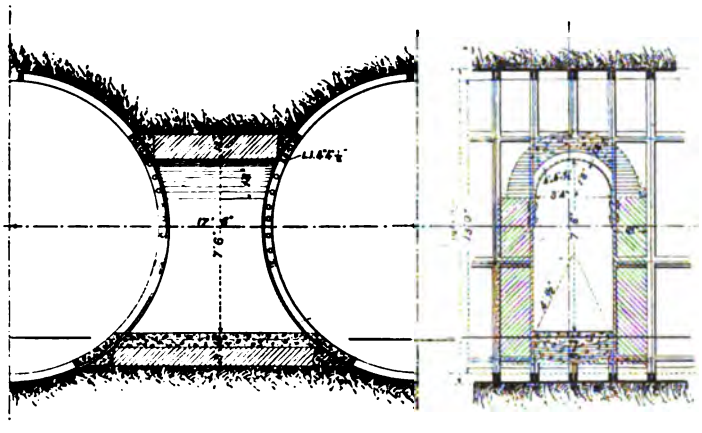


Fig. 266. — Coupes longitudinale et transversale d'une galerie de communication.

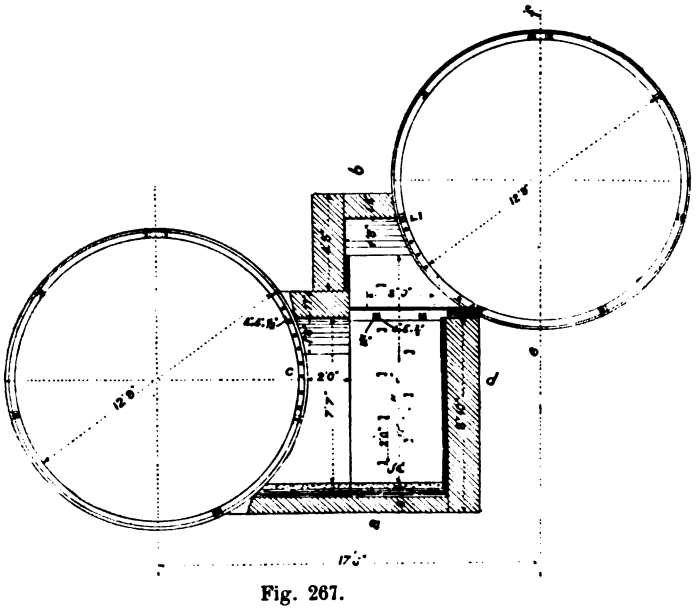


Fig. 267.
Coupe longitudinale d'une communication.

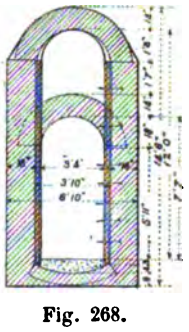


Fig. 268.
Coupe transversale sur *ab*.

Implantation des ouvrages. — L'implantation des ouvrages fut faite avec le même soin qu'au City and South London Ry. Sans en reprendre le détail, on rappellera qu'on a dû commencer par

établir des bases rattachées entre elles par une triangulation. Ce travail fut exécuté par M. l'ingénieur Hay avec un soin tel que l'écart entre la longueur calculée et la longueur mesurée pour la base du pont de Blackfriars n'atteignit pas 3/8 pouce (0,01 m..

Echafaudage en rivière. — La construction des souterrains fut confiée en juin 1894 à MM. John Mowlen and C°, dont les ingénieurs sont MM. W. Rowell et M.-C. Campbell. Ces entrepreneurs décidèrent d'exécuter tout le travail en partant de puits foncés dans le lit même de la Tamise, près de la rive gauche ou de Surrey, à 500 pieds (152,40 m.) du pont de Blackfriars (fig. 261 et 262). Le premier pieu fut battu le 20 juin 1894, et le montage terminé en novembre. Cet échafaudage n'est réuni à la rive que par une passerelle pour piétons qui aboutit dans une propriété privée au n° 15 de Upper Ground Street. Tous les déblais sont enlevés par eau et tous les matériaux amenés par la même voie. Sur cet échafaudage on installa les bureaux et magasins, ainsi que toute la machinerie comprenant : quatre grues roulantes, une de 5 tonnes, une de 3 tonnes et deux de 2 tonnes; quatre chaudières locomotives de 100 chevaux; trois dynamos de 100 volts et 112 ampères ; une dynamo de 200 volts et 112 ampères ; deux compresseurs à air de 250 chevaux, etc.

Fonçage des puits. — Le fonçage des puits fut commencé en août 1894. On se servit d'anneaux en fonte de 16 pieds (4,88 m. de diamètre, que l'on descendit à niveau plein en draguant à l'intérieur jusqu'à ce qu'ils eussent pénétré de 13 pieds (3,96 m.) dans l'argile. Au-dessous les puits furent continués, par reprise en sous-œuvre, avec un revêtement en maçonnerie de briques auquel on donna une épaisseur de 1 pied 6 pouces (0,46 m.) sur les 10 premiers pieds (3,05 m.) ; sur les 17 pieds (5,18 m.) restant on porta l'épaisseur de la maçonnerie à 2 pieds 3 pouces (0,69 m.), en modifiant graduellement la section, de manière à passer de la forme circulaire à celle d'un carré à angles arrondis.

En novembre, les deux puits étaient terminés et on pouvait procéder au montage des quatre boucliers destinés à l'attaque des deux galeries dans les deux sens. Ces galeries purent ainsi être

commencées les 26 novembre et 10 décembre 1894 pour l'un des souterrains et les 16 et 28 janvier pour l'autre.

Boucliers. — Les figures 269-270-271 représentent les boucliers pour la partie entre les puits et la Cité. Ceux qui servirent dans la direction de Waterloo (fig. 272-273-274) n'en diffèrent que parce qu'ils avaient 7 pouces 1/4 (0,18 m.) de diamètre en plus pour répondre à la section un peu plus grande de cette partie.

L'enveloppe se compose de deux tôles d'acier de 1/4 pouce (0,006 m.) d'épaisseur, 7 pieds

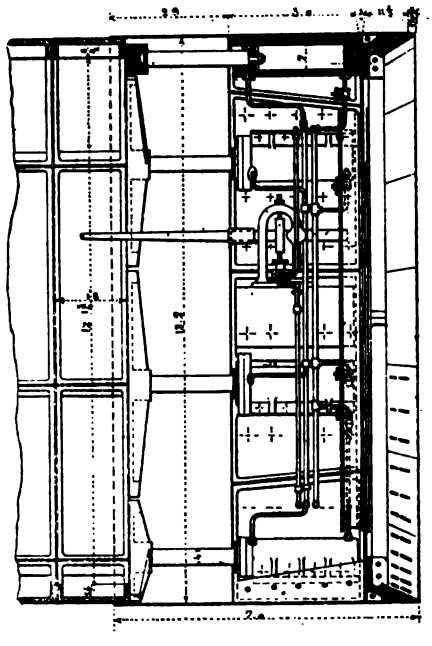


Fig. 269. — Coupe longitudinale du bouclier, petit modèle.

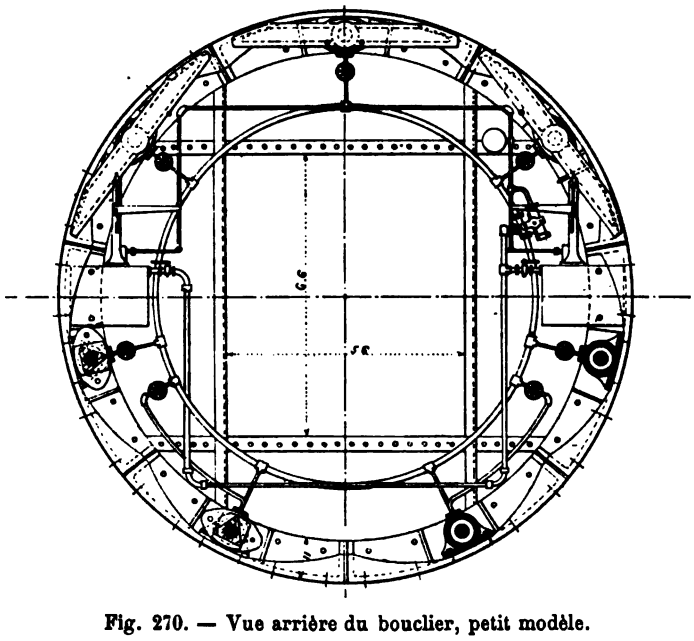


Fig. 270. — Vue arrière du bouclier, petit modèle.

(2,13 m.) de longueur et d'un diamètre extérieur de 13 pieds 2 pouces (4,01 m.), de manière à laisser autour de l'enveloppe un jeu d'un 1/2 pouce (0,0127 m.).

A l'avant-bec, cette enveloppe est raidie par un anneau en

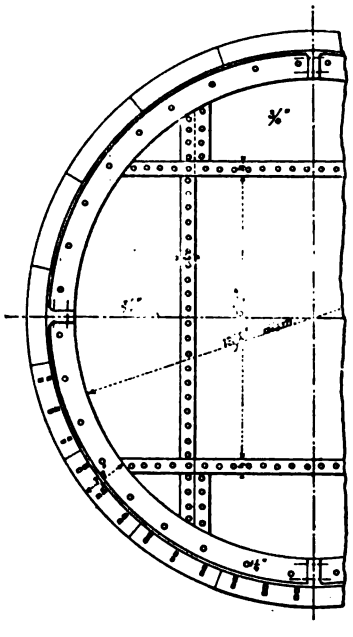


Fig. 271. — Vue avant du bouclier, petit modèle.

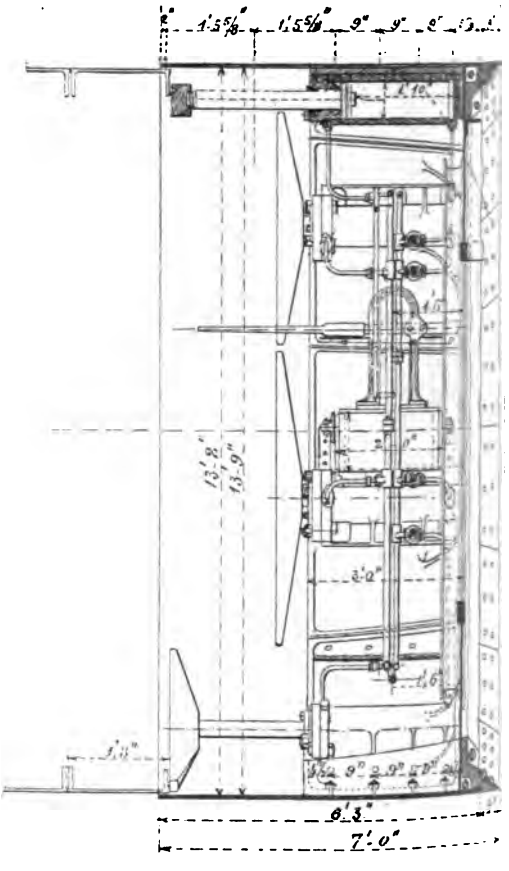


Fig. 272. — Coupe longitudinale du bouclier, grand modèle.

fonte, composé de 4 segments ; c'est à cet anneau qu'est attaché, avec des vis, le couteau en acier, conique, de 1 pouce (0,025 m.) d'épaisseur. Ce couteau en 18 morceaux pouvait, comme au City and South London, être réglé de manière à découper un passage plus large que le bouclier, mais on ne paraît pas avoir eu recours à ce dispositif.

La cloison verticale est en tôle de fer de 3/4 pouce (0,019 m.) d'épaisseur. On y voit, comme dans tous les boucliers de ce type, une ouverture rectangulaire de 6 pieds 6 pouces (1,98 m.) de hauteur, sur 5 pieds 6 pouces (1,68 m.) de largeur. Ce diaphragme est raidi par des bandes de fer horizontales et verticales de 4 pouces (0,10 m.) de largeur et 3/4 pouce (0,019 m.) d'épaisseur rivées sur

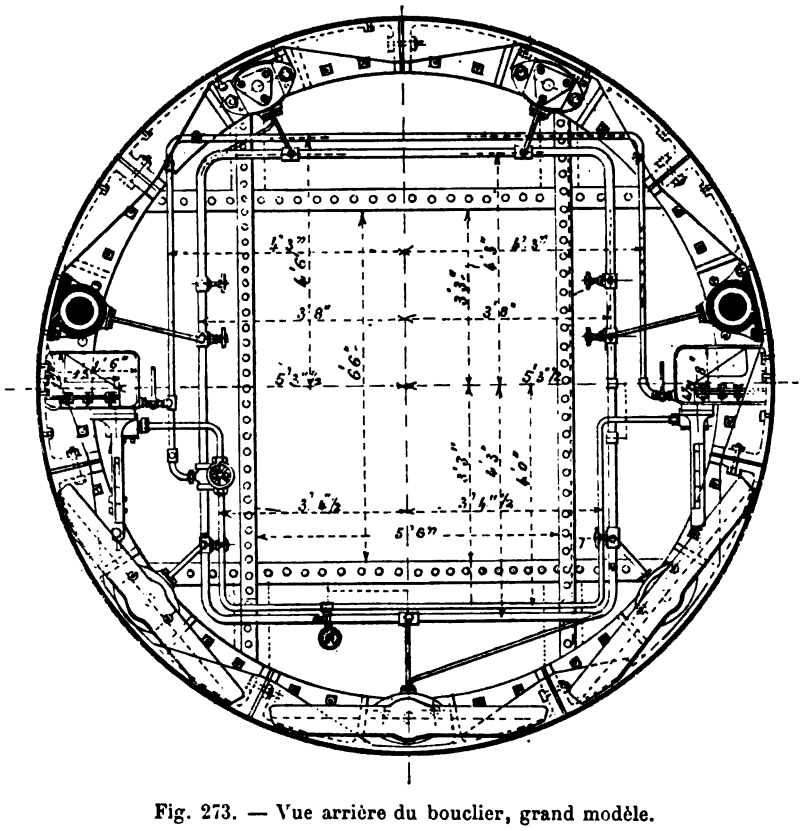


Fig. 273. — Vue arrière du bouclier, grand modèle.

les deux faces. Il porte en outre deux fers en U verticaux de 6 pouces × 3 pouces × 1/2 pouce (0,15 m. × 0,076 m. × 0,0127 m.) destinés à recevoir des bois pour la fermeture de la baie.

En arrière de la cloison, l'enveloppe est renforcée par un second anneau en fonte de 3 pieds (0,91 m.) de longueur formé de 7 segments dans chacun desquels sont logés les vérins hydrauliques.

Ces vérins ont 7 pouces (0,18 m.) de diamètre intérieur et 22 pouces (0,56) de course. Les cylindres sont en acier ainsi que les pièces fixées aux tiges pour prendre point d'appui contre le revêtement.

Il n'y a pas lieu d'insister sur les autres dispositions maintenant bien connues de ce type de bouclier.

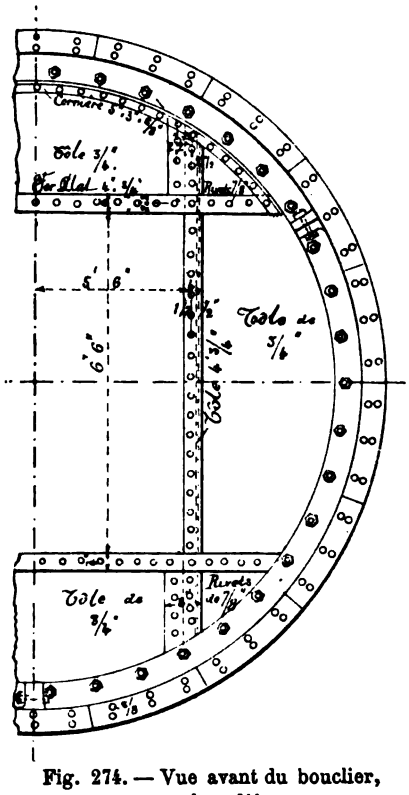


Fig. 274. — Vue avant du bouclier, grand modèle.

Avancement dans l'argile. — Dans l'argile, on exécutait en avant du bouclier une galerie boisée de 7 pieds (2,13 m.) de hauteur sur 5 pieds (1,52 m.) de largeur dans œuvre. Le boisage de cette galerie se composait de chapeaux 4 × 11 pouces (0,10 m. × 0,28 m.), de poteaux 3 × 11 pouces (0,076 m. × 0,28 m.) et de semelles en bois dur 9 × 9 × 3 pouces (0,23 m. × 0,23 m. × 0,076 m.).

L'avancement était de 2 à 3 anneaux de 20 pouces par équipe, soit 10 pieds (3,05 m.) par vingt-quatre heures. L'équipe employée dans une galerie comprenait 20 hommes.

On procédait aussitôt, après la pose des anneaux, à l'injection au mortier de chaux avec l'appareil Greathead déjà décrit et universellement employé.

Il ne restait plus à faire que le remplissage en béton tout au moins jusqu'au niveau de la voie de service. Le mélange se composait de 1 partie de ciment et 6 de ballast, sauf à la clef où l'on forçait le dosage et où l'on ajoutait du sable fin. Pour ce clavage, on se servait d'une boîte, dont les côtés étaient en bois ; le fond mobile était fait avec une tôle d'acier. Après l'avoir remplie de la quantité de béton nécessaire on la suspendait en place par des étriers aux boulons du revêtement. On soulevait alors la plaque

de fond, à l'aide de deux rouleaux mus par un levier, de manière à faire pénétrer le béton dans la clef, tandis qu'on laissait en place les étriers et la plaque, environ vingt-quatre heures, pour donner au mortier le temps de faire sa prise.

Dans la partie basse jusqu'à 20 pouces (0,58 m.) au-dessus de l'axe le remplissage se faisait avec des planches par les procédés habituels ; à la voûte on se servait de cintres.

Fig. 275. — Vue du bouclier et de l'attaque.

Les joints du revêtement étaient bourrés avec un mortier de ciment de Portland et de sable fin.

Transport des déblais. — Au début les bennes de déblais étaient placées sur des plates-formes basses et roulées à la main (fig. 277) jusqu'au puits où elles étaient enlevées par des grues à vapeur et déchargées dans des barques. Quand la distance augmenta, on se servit pour remorquer les déblais de locomotives élec-

triques Siemens. L'une de ces locomotives est représentée dans la figure 278. On peut remarquer l'emploi d'un trolley double, réuni à la machine par un câble flexible, ce qui permet de passer facilement dans les croisements et garages. La voie est de 18 pouces (0,457 m.). Une locomotive pouvait remorquer 5 ton. à une vitesse de 7 miles à l'heure (11,265 km.) en palier et de 3 miles à l'heure (4,828 km.) sur une rampe de 1/60.

Courbes. — Pour passer dans les courbes et diriger le bouclier

Fig. 276. — Exécution du revêtement en maçonnerie.

avec précision on se servait de règles à vernier fixées aux parois de chaque côté ; ce qui permettait de déterminer avec précision l'avancement d'un des côtés du bouclier par rapport à l'autre.

Pour la pose du revêtement, il suffisait, dans les courbes de grand rayon, de faire varier l'épaisseur de la fourrure en bois créosoté, placée entre les anneaux, de 3/8 à un 1/2 pouce (0,0095 m. à 0,0127 m.). Mais dans les courbes de 5 chaînes (100,58 m.) de rayon, on dut employer des anneaux spéciaux de 1 pied 8 pouces

13/32 (0,509 m.) de longueur du côté du grand rayon et 1 pied 7 pouces 19/32 (0,497 m.) du côté du petit rayon.

Sas à air. — Le travail à l'air comprimé nécessita l'installation de sas à air. Ils se composaient (fig. 279-280-281) d'un cylindre en

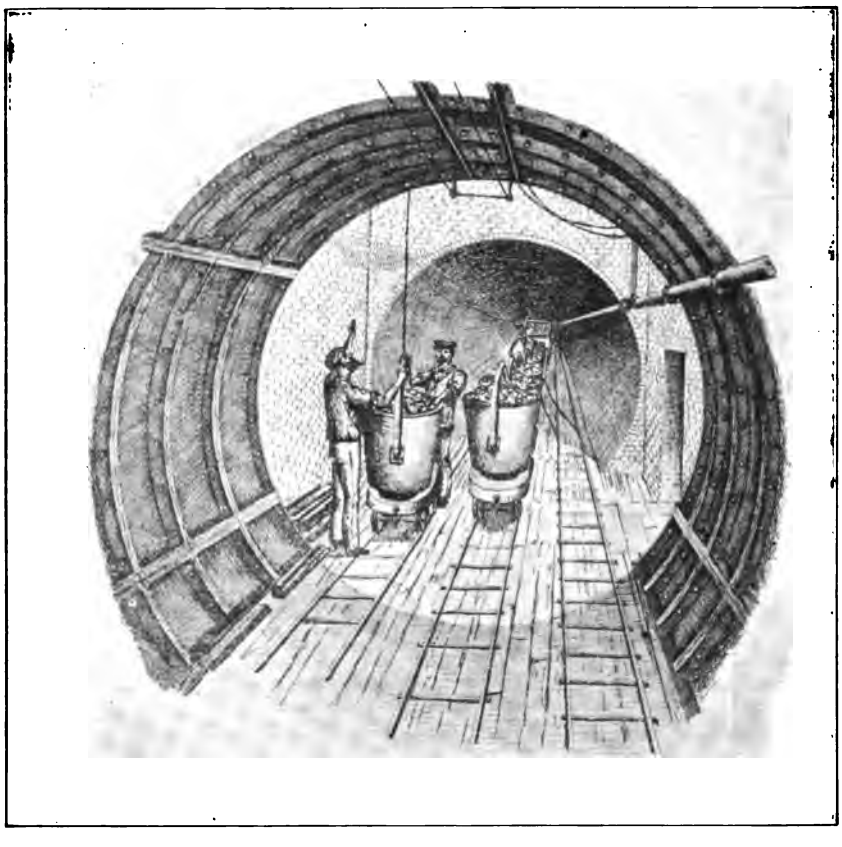


Fig. 277. — Enlèvement des déblais par le puits.

tôle de 5 pieds 9 pouces (1,75 m.) de diamètre intérieur et 13 pieds (3,96 m.) de longueur construits avec des tôles d'un 1/2 pouce (0,0127 m.) d'épaisseur, raidies par des anneaux en fer à T. On commençait par construire un mur en briques et ciment de 6 pieds 2 pouces (1,88 m.) d'épaisseur en travers de la galerie et on y plaçait non seulement le sas, mais les divers tuyaux nécessaires pour le service, à savoir : un tuyau de 12 pouces (0,30 m.) pour l'air com-

primé; un tuyau de 2 pouces (0,05 m.) pour l'appareil à injection, un tuyau de 2 pouces (0,05 m.) pour amener l'eau pour le gâchage du mortier ; un tuyau de 3 pouces(0,076 m.) pour l'évacuation des eaux de drainage; un tuyau de 2 pouces (0,05 m.) au sommet pour le passage des fils de courant électrique, pour la pompe, le

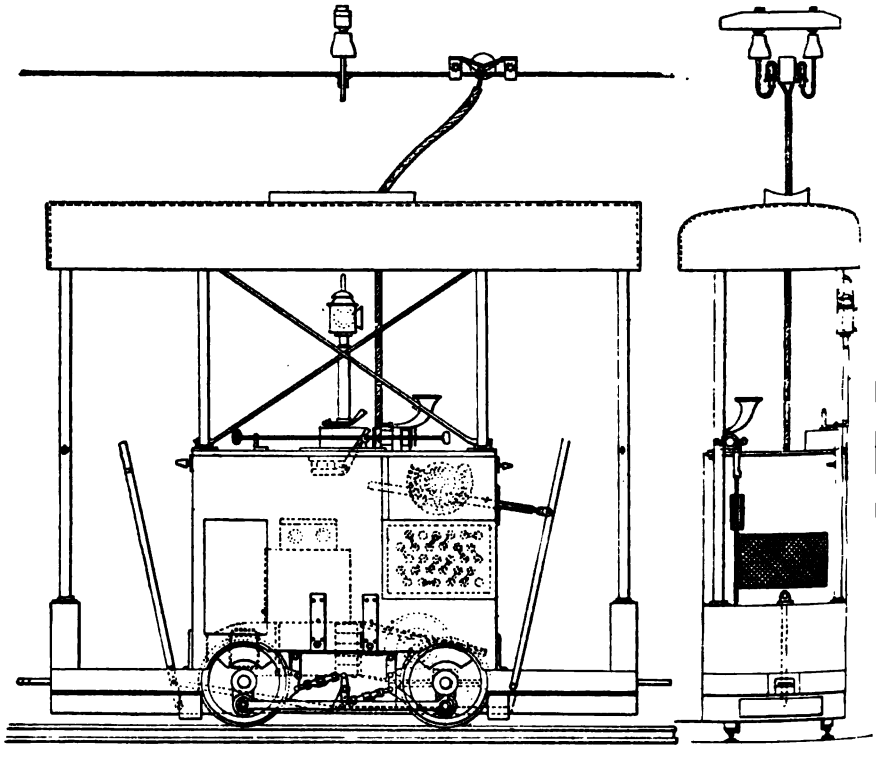


Fig. 278. — Locomotive électrique.

téléphone et l'éclairage ; un tuyau de 6 pouces (0,15 m.) de réserve en cas d'accident à l'un des autres tuyaux; enfin un tube de 30 pieds de longueur (9,14 m.) fermé aux deux bouts par des robinets, pour le passage des rails et autres matériaux. Les portes de l'écluse étaient en fonte de 1 pouce 1/4 (0,032 m.) d'épaisseur et raidies par des nervures. Les robinets d'admission et d'échappement pouvaient être ouverts du dedans et du dehors. Le remplissage et la vidange se faisaient en 45 secondes.

La figure 282 donne l'aspect général de l'écluse.

Emploi de l'air comprimé. — Aux termes de l'acte même d'autorisation, en passant au-dessous du Métropolitain District Ry, la Compagnie était tenue d'exécuter les reprises en sous-œuvre nécessaires ou d'employer l'air comprimé jusqu'à 30 yards (27,43 m.) de part et d'autre.

A la date du 22 mai 1895, on attaqua l'emploi de l'air comprimé dans la galerie contenant la voie montante vers Waterloo, qui, en raison de sa rampe douce, rencontrait, comme il a été dit, les

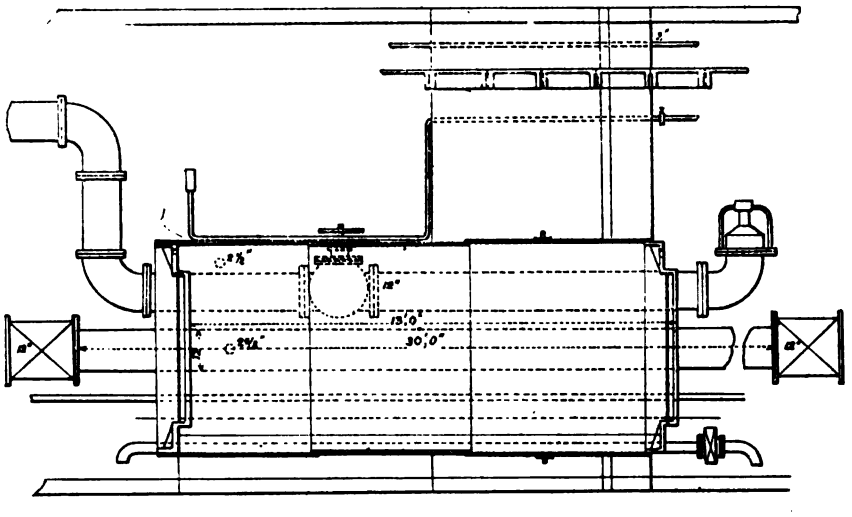


Fig. 279. — Coupe longitudinale du sas à air.

couches aquifères beaucoup plus tôt que la voie descendante, que l'on avait pu faire plonger rapidement. La pression était de 7 à 8 livres (0,5 kg.).

On y employa le boisage compliqué déjà décrit. La petite galerie de tête était généralement tenue à la longueur de deux anneaux en avant du bouclier.

Bouclier modifié. — Cette méthode était non seulement dangereuse, mais tous les bois de blindage étaient perdus, ce qui pouvait déterminer des tassements ultérieurs. M. l'ingénieur Hay a pris en 1896 un brevet n° 622 pour simplifier ce travail. Ce brevet s'exprime ainsi :

« Je prévois une visière de manière à former toiture en avant et

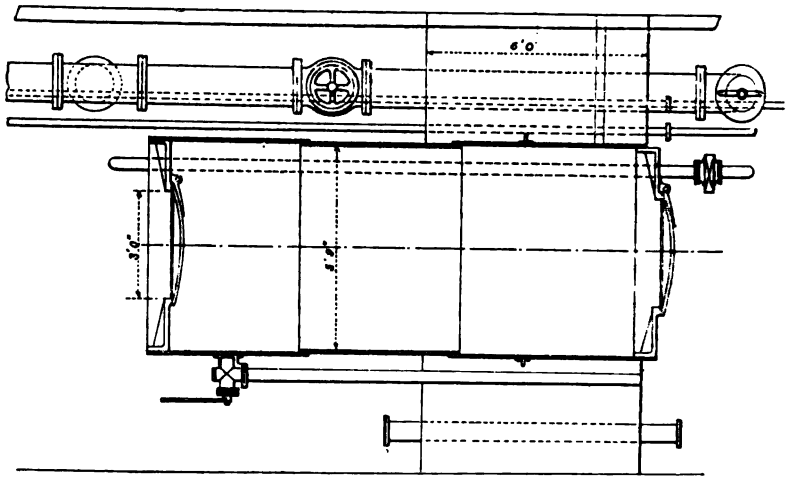


Fig. 280. — Coupe horizontale du sas à air.

« dans la partie haute du bouclier et j'introduis devant la trousse « coupante de cette visière « de l'argile dans laquelle « elle peut pénétrer. La « visière est attachée au « bouclier par des con- « soles et sur toute son « étendue remplace le « couteau.

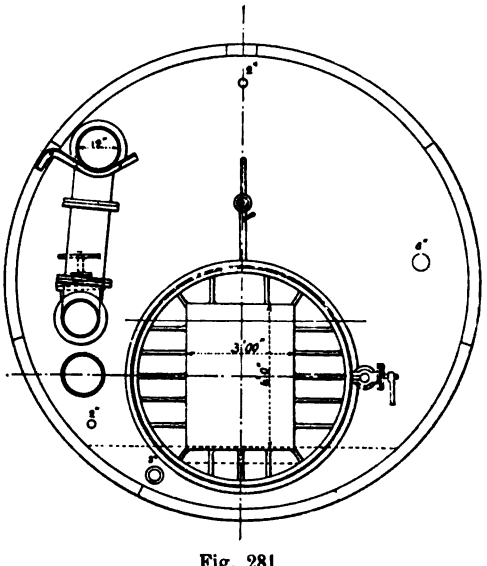


Fig. 281.
Élévation du sas à air.

« La marche du travail « est la suivante : on pré- « pare l'avancement de « la visière en creusant « une poche de quelques « pouces de large et peu « profonde, en face du « couteau de la visière, « par exemple au som- « met. Aussitôt cette fouille terminée, on la remplit d'argile, de « manière à maintenir le terrain meuble et empêcher les pertes

« d'air. Quand ce remplissage est terminé, on fait une autre « petite fouille à côté, et, ainsi de proche en proche on forme « une rainure sur toute la longueur de la visière et en face de « son arête, bien bourrée d'argile. Quand tout est prêt, on avance « le bouclier et sa visière qui entre aisément dans l'argile.

« On voit qu'à l'abri de cette visière il n'y a plus besoin de

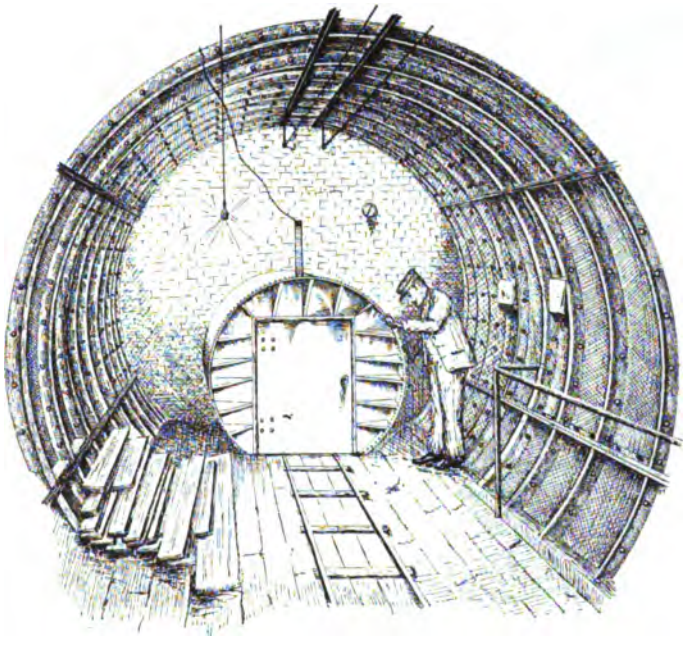


Fig. 282. — Vue perspective du sas à air.

« boisage au toit : ce qui assure une grande économie et un meil- « leur travail et diminue les risques de tassement. »

La figure 283 représente ce nouveau bouclier.

Ce procédé revient à allonger l'avant-bec et à permettre de travailler en avant de la cloison, sans galerie ni boisage perdu ; mais il conserve malheureusement encore le boisage du front de taille et les étais qui le soutiennent et passent à travers la porte. Il ne pare donc pas au danger d'accident analogue à celui de Melbourne.

On doit remarquer aussi le remplissage préalable de la partie, que doit entamer le couteau, avec de l'argile, qui est un retour

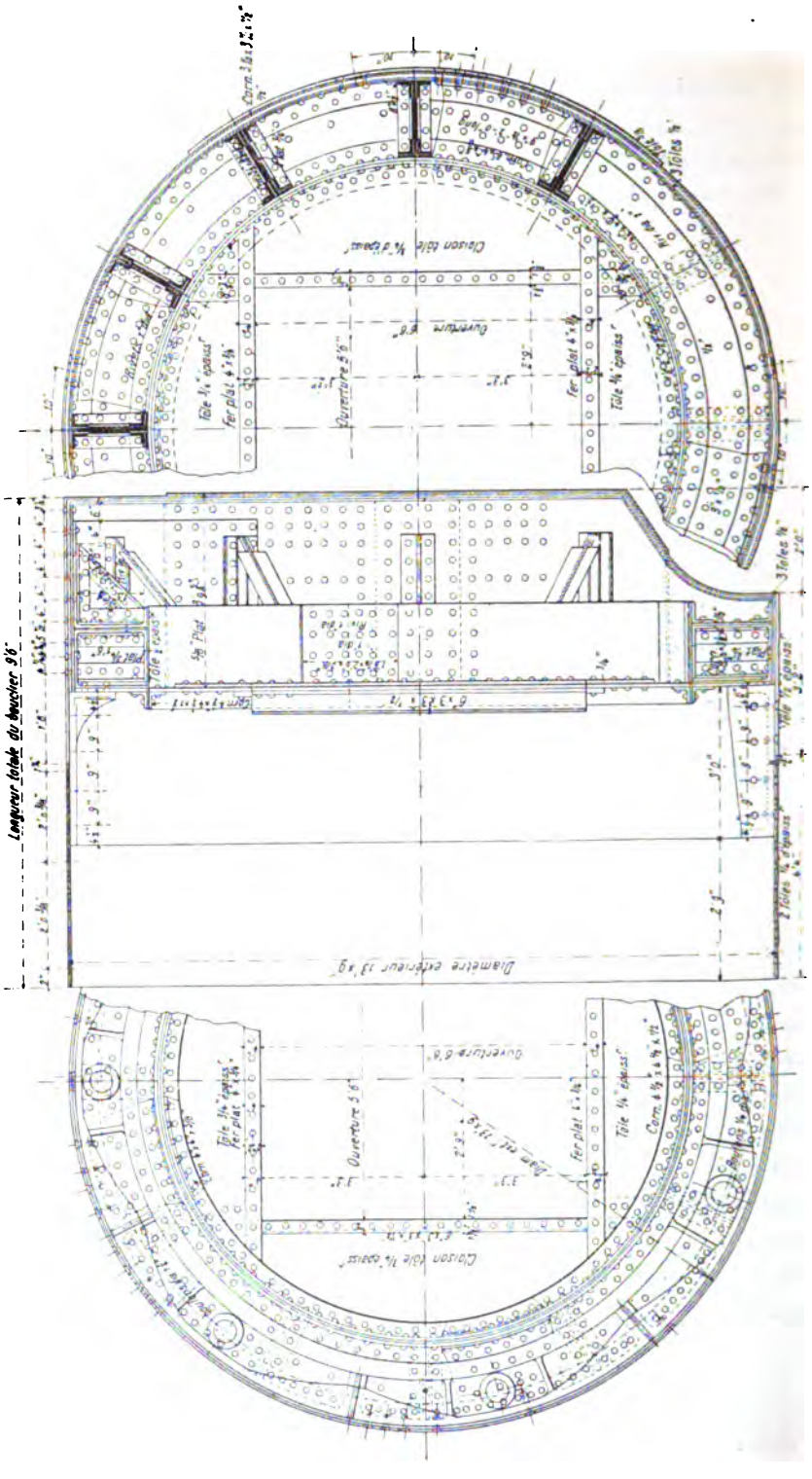


Fig. 283. — Bouclier à visière de M. Hay.

intéressant au procédé inauguré par Brunel pour les douves de toit.

Station de la Cité. — A la station de la Cité et sur une courte longueur en avant, les deux galeries sont réunies en une seule de 23 pieds (7,01 m.) de diamètre intérieur.

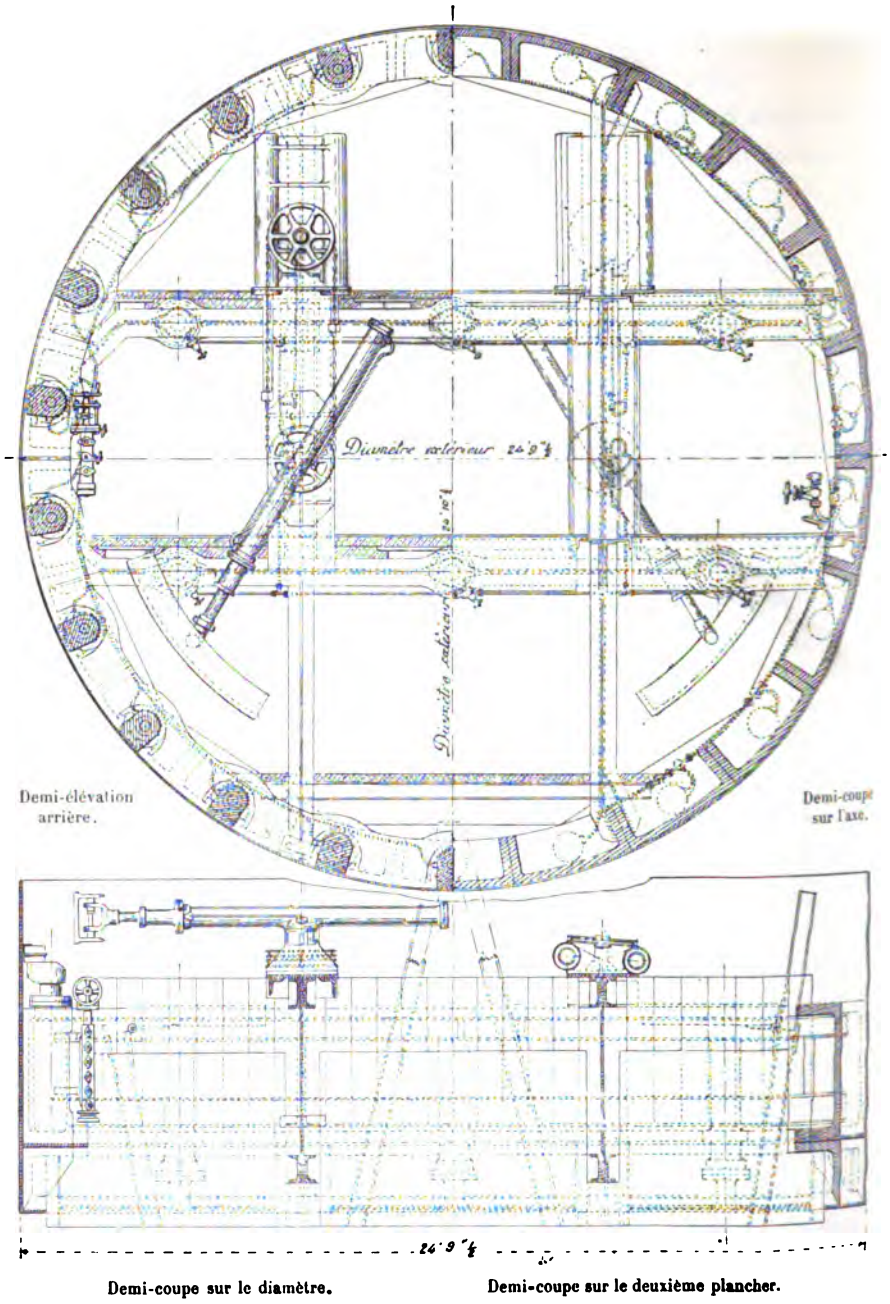
Le revêtement en fonte est formé d'anneaux de 18 pouces (0,457 m.) de longueur composés de 14 segments et d'une clef ; les nervures ayant 9 pouces (0,23 m.) de profondeur, le diamètre extérieur est de 24 pieds 6 pouces (7,47 m.). Ce revêtement est, sauf les dimensions, identique à celui de la galerie courante.

Pour faire ce travail on a employé un bouclier spécial. Pour le monter, on a d'abord, dans l'élargissement pour le croisement, fait une large fouille boisée avec revêtement en briques. Mais ce travail a été long, difficile et onéreux, en raison de la masse de bois qu'il nécessitait. Aussi quand on l'a remonté une seconde fois pour la station proprement dite, on a trouvé plus avantageux, pour maintenir les terres pendant le montage du bouclier, de substituer à la maçonnerie un revêtement en fonte dont le diamètre intérieur de 28 pieds (8,53 m.) permit le travail du montage. Ce revêtement avait de très fortes nervures de sorte que son diamètre extérieur s'élevait à 30 pieds 4 pouces (9,25 m.). Il s'étendait sur 18 pieds (5,49 m.). Toutes ces opérations ont dû être fort coûteuses. On peut en dire autant du bouclier qui pesait 100 t. (101 605 kg.) et a coûté 2 000 livres sterling (50 000 fr.). Cette dépense est d'autant plus élevée que le bouclier ne servira en deux fois que sur un parcours de 100 m. environ.

Quoi qu'il en soit, ce bouclier, représenté par la figure 284, est très intéressant.

Son diamètre vertical est de 24 pieds 10 pouces (7,57 m.). Sa disposition générale est celle du bouclier de voie courante. On y trouve l'enveloppe générale en acier ; l'anneau en fonte, qui renforce l'avant-bec ne porte pas de couteau ajustable en acier, mais il forme lui-même, avec l'enveloppe coupée en biseau, la trousse coupante.

La cloison n'existe plus ; elle est remplacée par deux divisions verticales et deux planchers très vigoureux en fers et tôles qu'en-

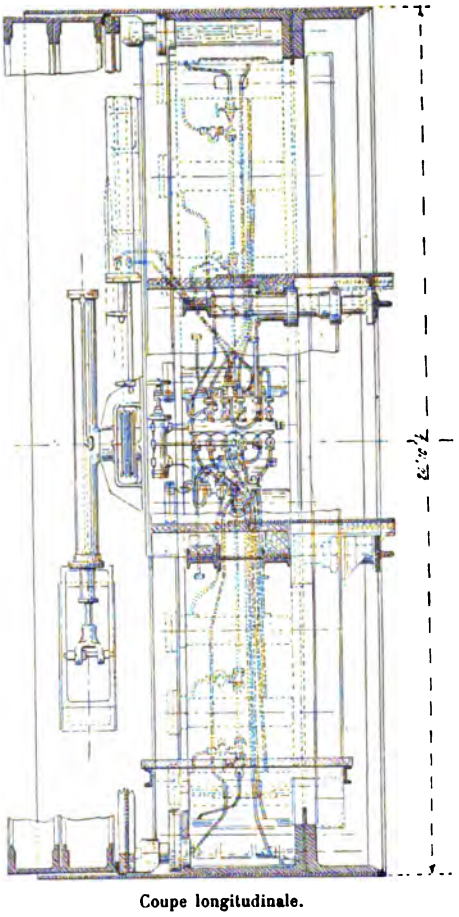


Demi-coupe sur le diamètre. Demi-coupe sur le deuxième plancher.

Fig. 284. — Bouclier de station.

tretoisent le bouclier et partagent l'attaque en 9 cellules. L'anneau de fonte d'arrière est divisé en 22 segments portant autant de vérins de 7 pouces (0,18 m.) de diamètre intérieur et de 21 pouces (0,53 m.) de course. Ces vérins ne s'appuient pas directement sur le revêtement en fonte; on interpose une fourrure en bois qui masque le jeu entre le bouclier et le revêtement et permet de faire l'injection de mortier, immédiatement derrière le bouclier, à mesure qu'il avance, et de prévenir ainsi tout tassement.

A l'arrière, le bouclier porte 2 grues hydrauliques pour le levage et la mise en place des segments. Le bras de chacune de ces grues est formé d'un vérin hydraulique de 4 pouces 3/4 (0,12 m.) de diamètre et 6 pieds 6 pouces (1,98 m.) de course. Ces bras eux-mêmes reçoivent par l'intermédiaire de poulies et de chaînes un mouvement de rotation d'un vérin de 6 pouces (0,15 m.) de diamètre et 4 pieds (1,22 m.) de course, fixé à la division verticale du bouclier.



Coupe longitudinale.

Fig. 284. — Bouclier de station.

Pour éviter l'emploi d'une galerie en avant du bouclier, on n'a pas eu recours ici à une visière mais à une disposition originale. Les planchers horizontaux, dans chacune des six cellules, peuvent s'avancer en avant du couteau et venir buter contre le front de taille, de manière à le maintenir pendant que l'on exécute la fouille en avant du bouclier sur la longueur d'un anneau. Ce mouvement s'obtient à l'aide de six vérins logés sous les planchers, de 7 pouces (0,18 m.) de diamètre et 1 pied 11 pouces 1/2 (0,59 m.) de course.

Tous ces vérins sont actionnés par la distribution de force hydraulique qui distribue l'eau à la pression de 750 livres par pouce carré (53 kg. par cm²); une machine spéciale relève cette pression à celle de 2000 livres (141 kg.) employé dans les vérins.

Il ne faut pas perdre de vue que le travail se fait dans l'argile compacte de Londres et que ce type de bouclier, qui laisse le toit à découvert ne saurait s'appliquer dans un terrain moins solide. Les planchers mobiles n'en sont pas moins une excellente idée qui rappellent les jalousies du bouclier de Blackwall et les vis du blindage de Brunel. L'emploi de la garniture à l'arrière pour maintenir le ciment injecté est une heureuse innovation.

CHAPITRE XII

COLLECTEUR DE CLICHY EXTRA MUROS

(1895-1897)

Exposé. — La loi du 10 juillet 1894 oblige la Ville de Paris à envoyer avant l'année 1900 la totalité des eaux d'égout dans les champs d'épuration de Gennevilliers, d'Achères, des Mureaux, etc., et à cesser tout déversement en Seine. Pour obtenir ce résultat toutes les eaux doivent être réunies à l'usine municipale de Clichy où elles seront relevées et renvoyées par le siphon de Clichy, dont l'exécution par la méthode du bouclier a été exposée au chapitre x. Déjà deux grands collecteurs, le collecteur d'Asnières et le collecteur Marceau amènent à l'usine la presque totalité des eaux; mais, par suite de l'augmentation constante de la population et de la consommation d'eau, ces collecteurs sont devenus insuffisants. On comprit par suite, dans le programme des travaux, la construction d'un nouveau collecteur, dit collecteur de Clichy. Cet ouvrage a son origine provisoirement fixée à l'église de la Trinité; il suit la rue et l'avenue de Clichy jusqu'aux fortifications; en dehors de Paris, il emprunte le boulevard National à Clichy jusqu'à une faible distance de la Seine et ne le quitte que pour aller rejoindre l'usine (fig. 285).

Profils en long et en travers. — Sur la presque totalité de son parcours, cet ouvrage a une section elliptique de 6,00 m. de largeur sur 5,00 m. de hauteur (fig. 286), avec revêtement en maçonnerie de 0,40 m. d'épaisseur à la voûte, de 0,60 m. aux naissances et de 0,45 m. au radier. A l'intérieur est ménagée une cunette de 4,00 m. de largeur et 2,00 m. de profondeur, bordée de chaque

côté de deux banquettes de circulation de 0,90 m. de largeur.

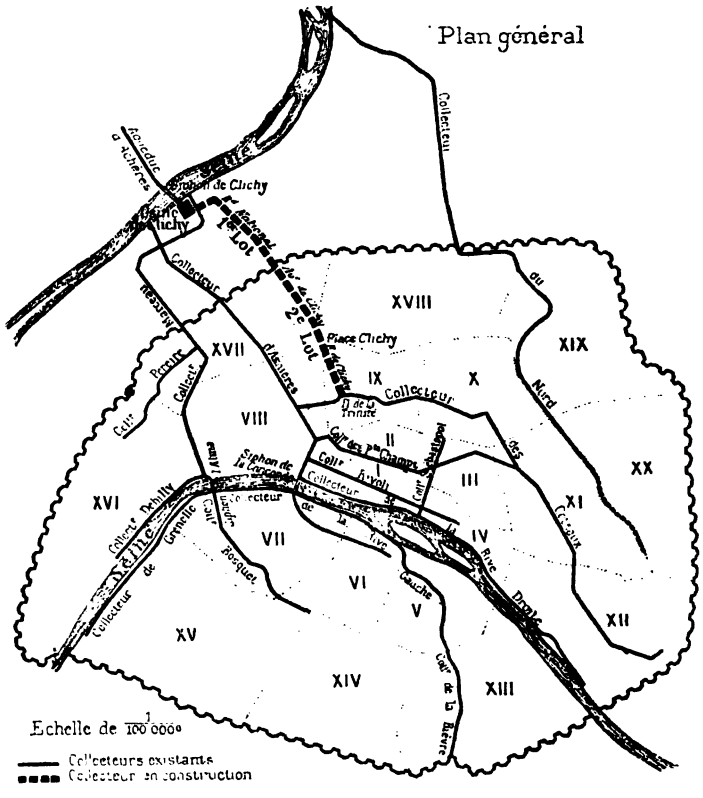


Fig. 285. — Plan général.

Sur la partie amont entre la place de la Trinité et la place Clichy, l'ouvrage aura 1,00 m. de moins de largeur.

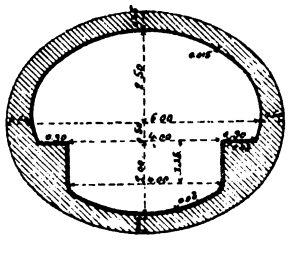


Fig. 286.
Profil type.

Le profil en long (fig. 287) offre pour le collecteur une pente continue de 0,50 m. par kilomètre tandis que le relief du terrain divise l'ouvrage en deux parties bien distinctes. Dans Paris le projet comporte l'exécution d'un souterrain à grande profondeur; hors Paris, au contraire, l'épaisseur de terre, réservée au-dessus de l'ouvrage, est très mince; elle atteint à peine 3,00 m.

au point le plus haut, n'est souvent que de 0,70 m. et descend en un point jusqu'à 0,43 m. C'est de cette partie extra muros qu'il va être parlé dans ce chapitre.

Programme d'exécution. — Le boulevard National, qui est emprunté par le collecteur, est une voie de circulation très importante. Il est suivi par un grand nombre de tombereaux emportant hors Paris des terres, des gravats et des gadoues, ainsi que par ceux amenant du sable, du gravier et des matériaux de construction de toute nature dans l'intérieur de Paris. Sur ce boulevard est également établie une double voie de tramways sur laquelle circulent, à de courts intervalles, des tramways à traction mécanique pesant 15 t. La nuit, la circulation n'est ni moins dense ni moins lourde; car la route est parcourue par les nombreuses et

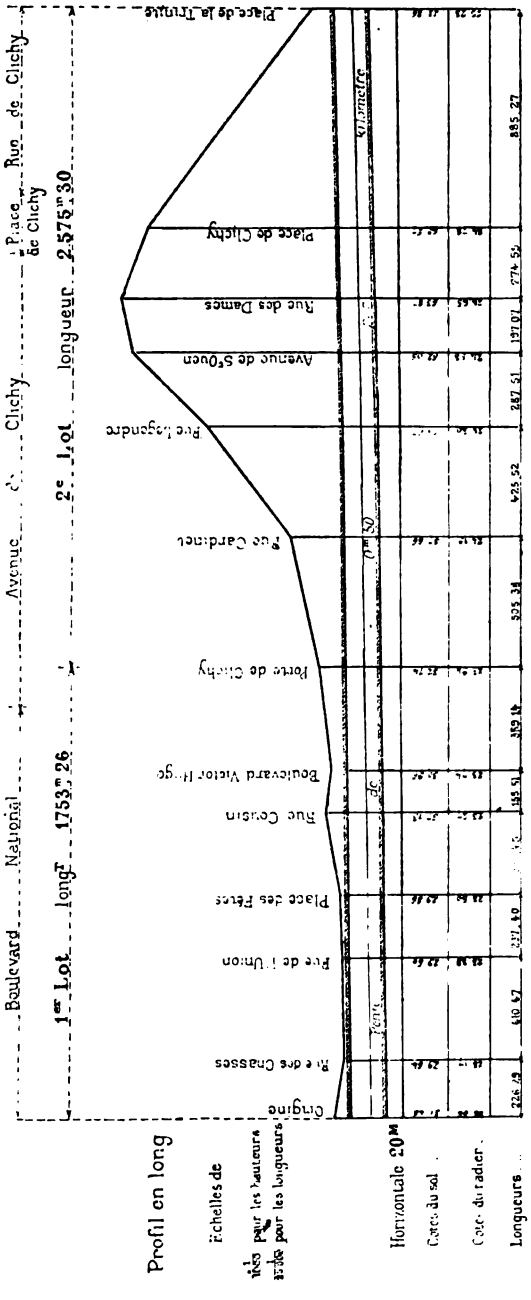


Fig. 287. — Profil en long.

pesantes voitures des maraîchers, qui apportent aux Halles Centrales les produits de la banlieue.

Le service de l'assainissement reconnut que ce serait créer un trouble grave à la circulation que d'ouvrir une tranchée de 8,00 m. de largeur dans une chaussée de 12,00 m., bordée de trottoirs étroits et plantés (fig. 288). Quoiqu'il fût autorisé à le faire, il crut de son devoir d'imposer aux entrepreneurs l'obligation d'exécuter l'ouvrage entièrement en souterrain. D'autre part le souterrain devait être ouvert dans un terrain de sable ébouleux et il était certain que la partie inférieure de l'ouvrage serait construite dans

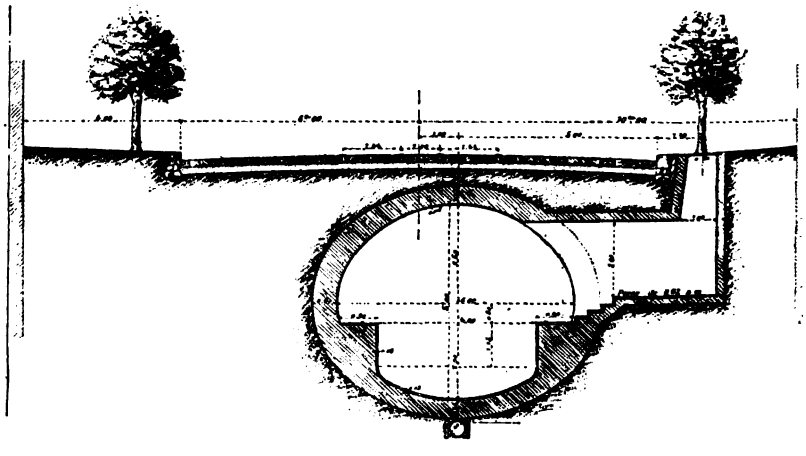


Fig. 288. — Coupe sur le boulevard National de Clichy.

une nappe d'eau très abondante et que les procédés habituels de boisage ne pouvaient pas offrir une sécurité suffisante pour maintenir des terres de cette nature, à une aussi faible profondeur et avec une circulation aussi lourde et aussi intense.

En conséquence, les entrepreneurs furent appelés à soumettre tout d'abord leurs procédés d'exécution. Divers projets furent présentés. Quatre seulement furent admis. Ils dérivaient de la méthode Belge et comprenaient l'exécution de la voûte dans la partie sèche, puis ultérieurement celle des piédroits et du radier dans les couches aquifères. Confiants dans l'abri que devait leur procurer la voûte maçonnée, les entrepreneurs n'avaient rien changé aux procédés habituels d'exécution de la partie basse. Quant à la partie haute,

au lieu de placer le blindage pièce à pièce au fur et à mesure du dégagement de la fouille, ils proposaient de le monter d'un coup à l'abri d'une carapace métallique ; les maçonneries devaient être faites, comme d'usage, à l'arrière sous ce blindage. C'était une application timide du bouclier à l'exécution d'une voûte en maçonnerie, en passant par l'intermédiaire d'un blindage provisoire qui tenait lieu, pour l'avancement du bouclier, du revêtement métallique.

Le projet, présenté par M. Chagnaud, étant à la fois le mieux conçu et le plus économique, fut agréé. Cet entrepreneur s'engageait à exécuter l'ouvrage entièrement en souterrain, sur la longueur de 1 700 m., au prix de 1016,60 fr. par mètre courant, inférieur à l'estimation faite pour l'exécution en tranchée.

Il ne sera pas parlé des autres dispositifs proposés, qui n'ont pu être soumis à la sanction de l'expérience, quelque ingénieux qu'ils aient pu paraître.

Le bouclier. — Le bouclier (fig. 289 et 290) se composait

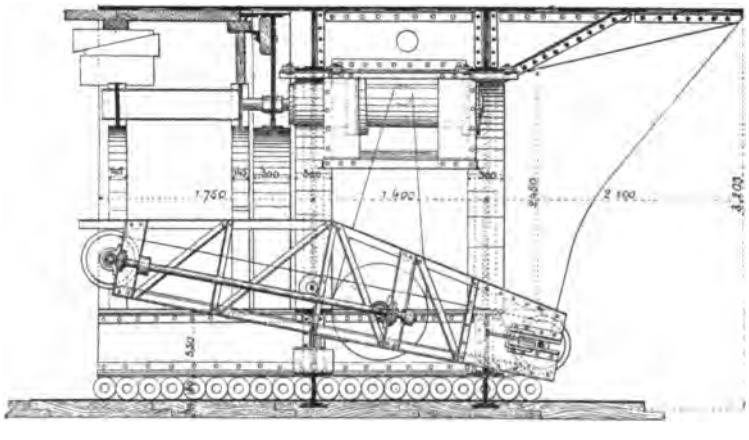


Fig. 289. — Coupe longitudinale du bouclier.

d'une enveloppe demi-elliptique de 7,25 m. de largeur et 2,95 m. de hauteur, en tôle de fer de 14 mm. d'épaisseur, renforcée à tous les joints par de larges plates-bandes de même épaisseur.

Cette enveloppe était supportée par deux poutres elliptiques (fig. 291), constituées par une âme en tôle de 0,012 m. d'épais-

seur et 0,50 m. de hauteur, par une semelle inférieure de 20 mm.

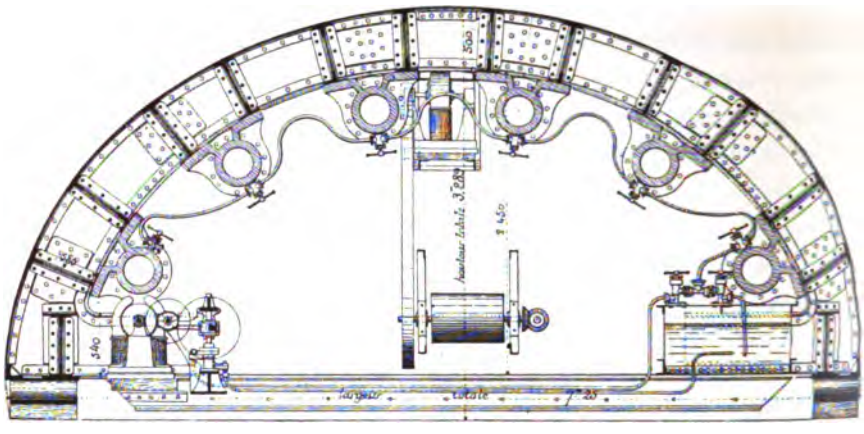


Fig. 290. — Vue arrière du bouclier.

d'épaisseur et de 0,30 m. de largeur, et par des cornières $\frac{80 \times 80}{10}$

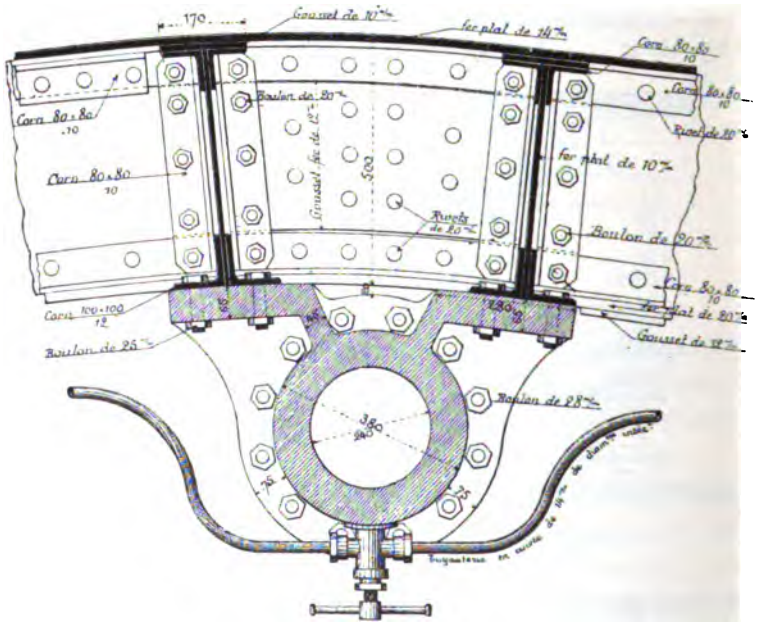


Fig. 291. — Détails d'une poutre.

servant à l'assemblage de l'âme tant avec la semelle qu'avec l'enveloppe. Ces deux poutres, espacées de 1,40 m. d'axe en axe, for-

maient le corps du bouclier. Elles étaient réunies entre elles par douze entretoises de 0,50 m. de hauteur. Ces pièces placées suivant les génératrices de l'enveloppe se composaient d'une âme de 10 mm. et de cornières de $\frac{80 \times 80}{10}$.

L'avant-bec avait primitivement 1,20 m. de longueur au sommet et formait visière. Postérieurement les tôles d'enveloppe et les goussets de l'avant-bec furent allongés et la longueur portée à 2,10 m. Ces goussets étaient faits avec des tôles et cornières de

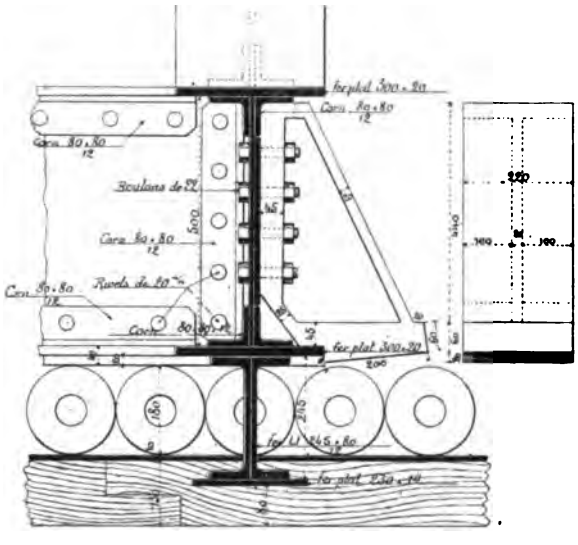


Fig. 292. — Détails des sabots et du chemin de roulement.

même dimension que les entretoises. La queue, sous laquelle devait se monter le blindage provisoire, était lisse et occupait une longueur de 1,75 m.

A la partie inférieure, les deux grandes poutres transversales reposaient sur deux poutres longitudinales de 0,55 m. de hauteur, avec une âme en tôle et deux semelles de 300 × 20 assemblées avec des cornières 80 × 80 × 12 (fig. 289, 290 et 292). Ces poutres s'étendaient depuis l'extrémité arrière de la queue jusqu'à la poutre elliptique d'avant. Dans l'avant-bec ces longerons étaient remplacés par des sabots en fonte (fig. 292), dont le but sera expliqué plus loin.

Pour opérer l'entretoisement suivant le diamètre horizontal et porter le plancher de travail, deux poutres horizontales raccordées aux poutres elliptiques traversaient le bouclier perpendiculairement à l'axe du souterrain. Ces poutres furent modifiées ultérieurement, mais on en voit encore les amorces à droite et à gauche de la figure 290, ainsi que la coupe de l'une d'entre elles sur la figure 292. Elles avaient 0,54 m. de hauteur et se composaient d'une âme en tôle et de deux semelles de 20 mm. d'épaisseur et 0,30 m. de largeur, assemblées sur des cornières 80 × 80 × 12. Ces poutres avaient le défaut de réduire considérablement la hauteur libre sur les côtés et de placer le plancher de service à près de 1,00 m. au-dessus du fond de la fouille dans la chambre de travail ; il en

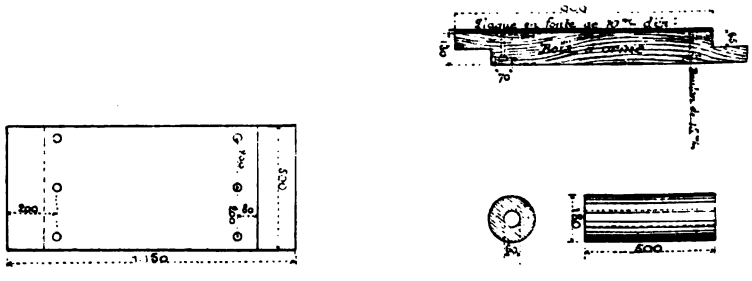


Fig. 293. — Détails des rouleaux et des semelles.

résultait une grande gêne pour la circulation des ouvriers et l'évacuation des déblais. Aussi, peu de temps après la mise en marche, l'entrepreneur les fit-il couper dans la partie centrale sur environ 4,00 m. de longueur. La semelle inférieure de 20 × 300 fut seule conservée et constitua la semelle supérieure d'une poutre de 0,279 m. de hauteur placée en dessous. Cette dernière fut formée de deux fers U de 245 × 80 × 12 placés dos à dos et d'une semelle inférieure de 230 × 14 (fig. 290 et 292). Le plancher de service en tôle de 0,01 m. d'épaisseur fut placé sur ces poutres à 0,52 m. en contre-bas de sa position primitive.

Le bouclier, ainsi constitué par l'enveloppe semi-elliptique et le plancher horizontal, présentait à la base une large partie plate qui aurait offert une résistance à l'avancement considérable. Aussi tout le poids en fut-il reporté sur les flancs. A cet effet, une tôle de 0,02 m. d'épaisseur fut placée sous les longerons et étendue

jusqu'à l'arête inférieure de l'enveloppe à laquelle elle fut assemblée par une cornière. On disposait ainsi de deux chemins latéraux très lisses de 0,600 m. de largeur et de toute la longueur de la queue et du corps du bouclier, soit de 3,15 m.

Ces deux surfaces d'appui reposaient par l'intermédiaire de rouleaux en fonte sur un chemin de roulement en bois (fig. 289, 290 et 292). Les rouleaux de fonte avaient un diamètre de 0,18 m. et une longueur de 0,500 m. avec un vide central de 0,06 m. de diamètre (fig. 293). Les plateaux de roulement étaient en bois d'orme (fig. 293); ils avaient 0,13 m. d'épaisseur, 0,50 m. de largeur et 1,00 m. de longueur utile et se plaçaient à la suite les uns des autres par un assemblage à mi-bois de 0,15 m. de profondeur. Ces pièces de bois étaient en outre garnies à la partie supérieure d'une plaque de tôle de 0,01 m. d'épaisseur.

Vérins. Poutre mobile. — L'avancement du bouclier était assuré au moyen de six vérins espacés de 1,20 m. d'axe en axe

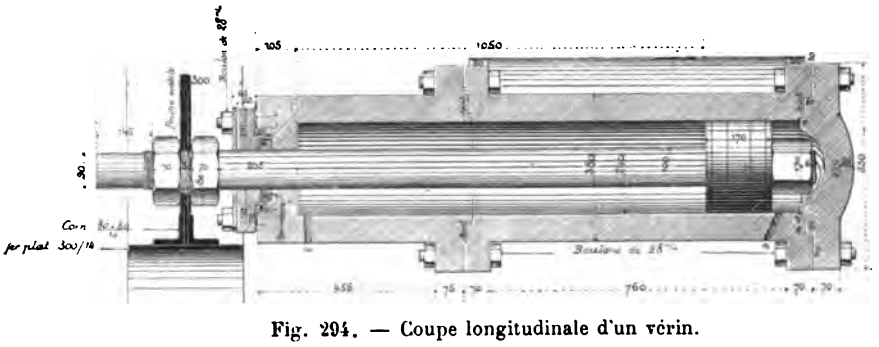


Fig. 294. — Coupe longitudinale d'un vérin.

(fig. 290). Ces vérins étaient fixés à la semelle inférieure des grandes poutres elliptiques à l'aplomb des entretoises (fig. 291). Les cylindres avaient 0,24 m. de diamètre intérieur et des parois de 0,07 m. d'épaisseur, ce qui portait leur diamètre extérieur à 0,38 m. A l'intérieur de ces cylindres (fig. 294) se déplaçait un piston avec joints en caoutchouc aux deux extrémités, ce qui permettait le mouvement dans les deux sens (fig. 295). La course totale était de 1,00 m. Les tiges de ces vérins, de 0,10 m. de diamètre, étaient toutes réunies, par de doubles écrous, à une poutre ellip-

tique, pouvant avancer ou reculer sous la queue du bouclier, en frottant contre l'enveloppe métallique et en s'appuyant en bas sur les longerons. Ce dispositif était nécessité par les besoins de l'établissement du blindage. Cette poutre (fig. 296) comprenait : une âme en tôle de 0,92 m. de hauteur et 0,01 m. d'épaisseur, renforcée, sur chaque face, par des goussets de 0,014 m. d'épaisseur et raidie de part et d'autre des points d'attache des vérins par des cornières 80 × 80 × 14. La semelle inférieure, assemblée par des cornières de mêmes dimensions, avait 0,014 m. d'épaisseur et 0,30 m. de largeur. La semelle supérieure, de même épais-

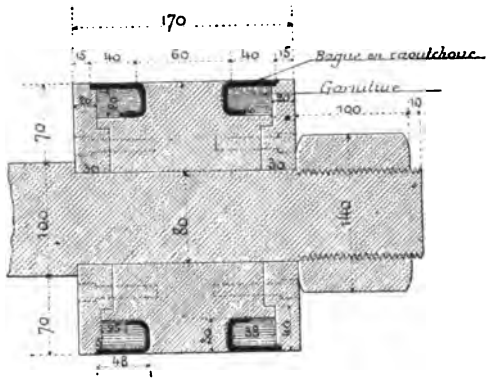


Fig. 295. — Coupe du piston.

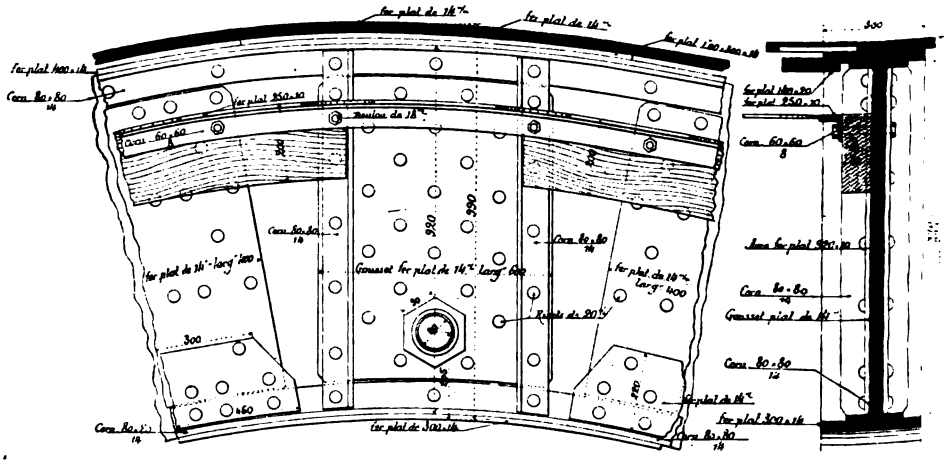


Fig. 296. — Détails de la poutre mobile.

seur et assemblée de même à l'âme, se prolongeait de 0,10 m. vers l'arrière, ce qui portait sa largeur à 0,40 m. Ce prolongement était renforcé en dessous par un fer plat de 20 mm. d'épaisseur et 0,14 m. de largeur. Des fers plats de 0,30 m. de largeur, 1,00 m. de longueur

et 0,014 m. d'épaisseur assemblés avec des rivets à tête fraisée, étaient placés entre cette semelle et l'enveloppe, au-dessus du point d'attache de chaque vérin. C'est contre ces fers que s'effectuait le glissement pendant le déplacement de la poutre. Un dispositif analogue facilitait aux deux extrémités le glissement sur les longerons. Enfin on voit, sur la figure 296, fixé à l'âme par une fourrure en bois, un fer plat de 250 × 10 avec des entailles dont l'usage pour l'établissement du blindage sera expliqué ci-après.

Appareils accessoires. — En première ligne, il faut placer les cintres qui servaient de points d'appui aux vérins par l'intermé-

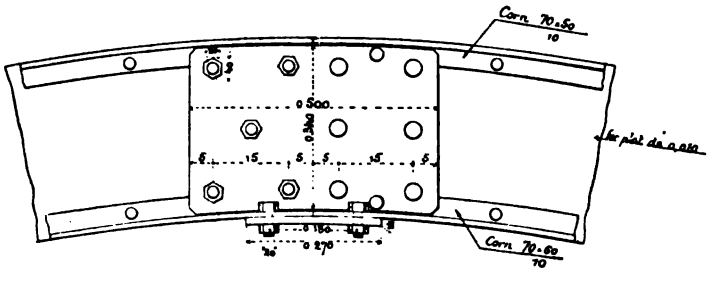


Fig. 297. — Élévation d'un cintre et de son assemblage.

diaire de la poutre mobile, soutenaient le blindage provisoire et servaient à l'exécution de la maçonnerie.

Ces cintres métalliques avaient une âme de 0,36 m. de hauteur et 0,01 m. d'épaisseur, raidie sur les bords par quatre cornières $\frac{78 \times 50}{10}$. Ils étaient formés par deux morceaux symétriques assemblés par trois éclisses placées de chaque côté de l'âme et sous la semelle inférieure (fig. 297 et 298). Ces cintres étaient espacés de 1,00 m. d'axe en axe et réunis entre eux à la hauteur de chaque vérin par six entretoises (fig. 299). Ces entretoises, en fer à I, reposaient sur des cornières 55 × 55 × 7 attachées aux cintres auxquels elles étaient fixées par deux boulons de 18 mm. Les cintres, au nombre de 30, ainsi entretoisés, formaient une carcasse solide capable de recevoir la poussée des vérins.

Ces derniers étaient primitivement alimentés par deux pompes à bras placées de chaque côté du plancher de travail. On reconnut

bien vite que ces pompes étaient trop lentes et absolument insuffisantes. On ne put faire monter la pression au-dessus de 50 kg. correspondant à un effort de 22,6 t. par vérin, soit à un effort total de de 135,6 t.; et cela au prix de très grandes fatigues pour les ouvriers. On établit sur le côté gauche du bouclier (fig. 290), quatre pompes actionnées par une dynamo de 220 volts 20 amp. La transmission se faisait par engrenages avec pignons en cuir et les pompes, attaquées par des excentriques, fonctionnaient alternativement. Chacune de ces pompes (fig. 300) avait un piston de 40 mm. de diamètre et une course de 0,10 m. Elles puisaient l'eau dans une bâche, placée de l'autre côté de la plate-forme de travail (fig. 290), et la refou-

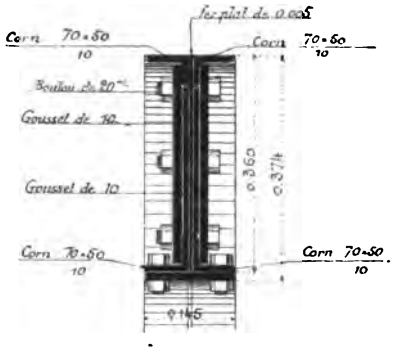


Fig. 298. — Coupe d'un cintre sur l'assemblage.

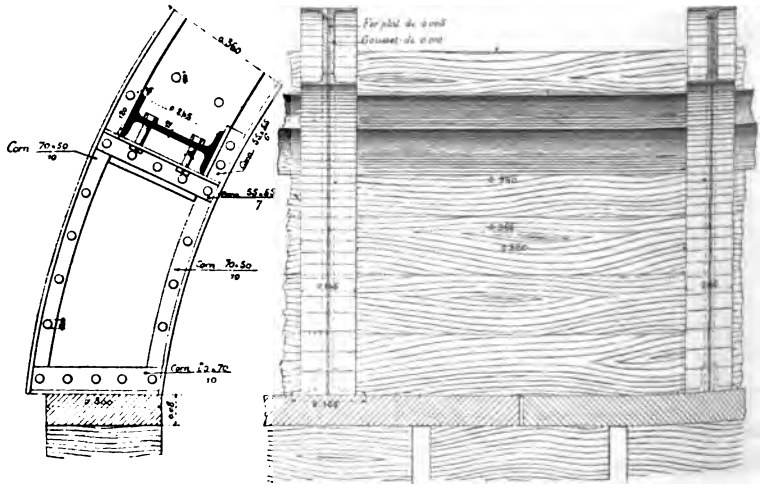


Fig. 299. — Entretoises réunissant les cintres.

laient à une pression pouvant atteindre 200 kg. dans les vérins, par une tuyauterie en cuivre de 14 mm. d'épaisseur. Cette tuyauterie était double, de façon à pouvoir faire l'admission dans les deux

sens, et chaque vérin était muni d'un robinet permettant de l'isoler.

On installa enfin, pour activer l'évacuation des déblais et éviter un jet de pelle sur la plate-forme de travail un transporteur représenté sur les figures 289 et 290. Ce transporteur se composait

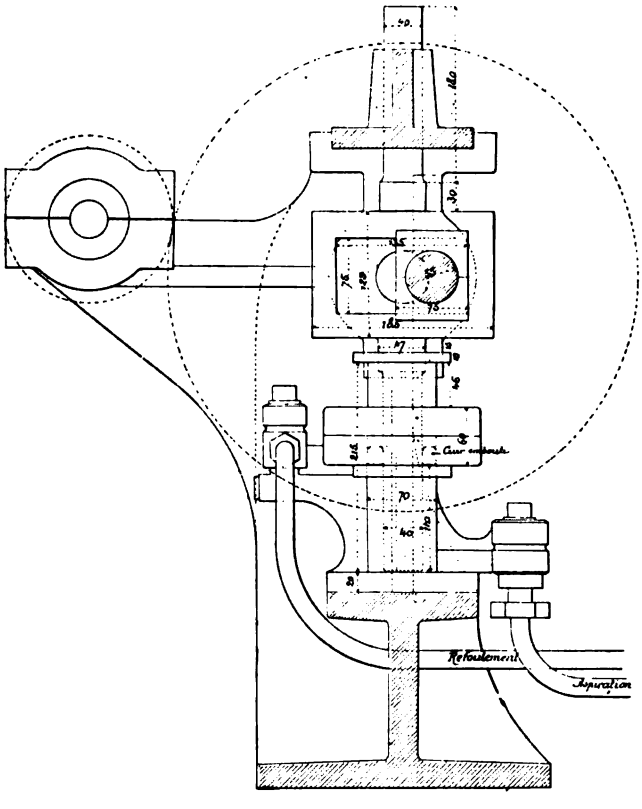


Fig. 300. — Pompe de compression.

d'une courroie en coton, mise en mouvement par une dynamo de 220 volts, 15 à 20 amp. Les déblais, jetés par les ouvriers occupés à l'avancement sur le transporteur, étaient versés directement en arrière du bouclier dans les wagons destinés à les emporter à la décharge.

Fonctionnement de l'appareil. — Le déblai était fait à l'abri de l'avant-bec jusqu'à l'arête de la trousse coupante et dressé sui-

vant un talus aussi raide que le permettait la nature du terrain. Quand il était bon, on déblayait devant le plancher sur une longueur de 1,00 m. correspondant à une course en laissant un talus du 1/4. Lorsqu'il ne pouvait se tenir avec une pareille inclinaison, on fractionnait la course. Il fallait en même temps procéder à une opération délicate, l'exécution, en face de chacun des longerons, d'un four pour placer la semelle et les rouleaux sur lesquels devait s'avancer le bouclier (fig. 289). Les semelles reposaient généralement sur un cours de planches de sapin, qui répartissaient la pression sur le sol et servaient ultérieurement de points d'appui aux cintres et à la maçonnerie. Sur deux points, on trouva un

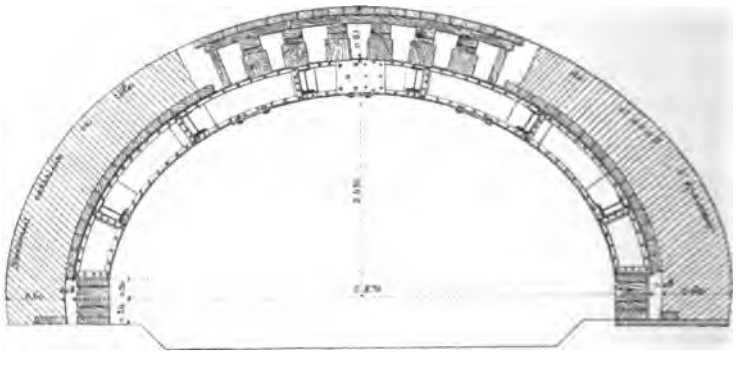


Fig. 301. — Exécution des maçonneries.

sable argileux mouillé dans lequel on dut battre de petits pieux pour soutenir ces semelles.

Le bouclier se trouvant dans la position de la figure 289, on mettait en mouvement les pompes et on introduisait l'eau sous pression dans les vérins. Les tiges de ces derniers prenaient point d'appui sur les cintres. Ces derniers, entretoisés les uns aux autres au nombre de 30, formaient, tant par leur poids que par le serrage du terrain, une masse suffisamment résistante pour supporter l'effort des vérins. On n'a eu que rarement besoin de placer à l'arrière des contrefiches de butée. Le bouclier avançait sur les rouleaux, présentés successivement sous les sabots en fonte. Le couteau pénétrait dans le sol qui était ainsi désagrégé et, sauf de rares exceptions, tombait naturellement sans le secours des ouvriers.

Quand la course était finie, il n'y avait plus qu'à abattre le massif central.

A l'arrière, la poutre mobile qui, au début, s'était serrée contre le blindage par sa large semelle supérieure, a servi pendant toute la course à soutenir la queue du bouclier, qui se dégageait en glissant sur le blindage et la poutre. Quand la course était finie, on introduisait l'eau par l'autre extrémité des vérins dont les tiges revenaient en arrière en entraînant la poutre mobile. La queue du bouclier se trouvait ainsi entièrement libre et prête à abriter une nouvelle longueur de blindage.

On montait alors un cintre en en réglant la hauteur au moyen de pièces de bois et de coins représentés figure 301, on le reliait au cintre précédent à l'aide des entretoises. Le blindage se composait de couchis de 0,08×0,16 de 1,00 m. de longueur, appliqués exactement contre la queue et portant sur de faux chapeaux au-dessus de chaque cintre. Sur le cintre primitivement placé, l'intervalle entre le cintre et le faux chapeau, correspondant à l'épaisseur de la maçonnerie à exécuter ultérieurement, était rempli par de gros coins qui reportaient sur le cintre la pression des terres sur le blindage. Au-dessus du nouveau cintre, le faux chapeau était d'abord placé sur la couronne en fer plat, attachée à la poutre mobile, dont la distance était telle que l'on pouvait entrer librement les couchis. On plaçait ensuite, entre le cintre et le faux chapeau, des butons qui passaient par les entailles demi-circulaires ménagées dans la plaque et on les serrait, de manière à soulever le faux chapeau et à appliquer le blindage contre la queue du bouclier; la poutre mobile devenait ainsi libre pour la course suivante. Il restait à prendre une dernière précaution. Quand la queue du bouclier avançait, elle laissait un vide de 0,03 m. On essaya d'y obvier en serrant ce blindage contre le terrain à l'aide des coins, placés entre les cintres et les faux chapeaux.Pendant toute la durée de l'avancement, des hommes étaient occupés à frapper sur ces coins.

Exécution des maçonneries. — Lorsque ce blindage était établi, le rôle du bouclier était terminé et on disposait d'une fouille boisée, prête à recevoir la maçonnerie.

La maçonnerie se faisait environ 10 à 20 m. en arrière. On commençait par exécuter des murettes sur la hauteur du calage des cintres, puis on montait la voûte. A cet effet, on enlevait un à un les couchis du blindage, en déplaçant les coins et les butons, et on les reposait sur les cintres, comme l'indique la figure 301.

Cette opération était longue et délicate; dans les sables, il arrivait souvent qu'au moment de l'enlèvement du couchis, il se produisait des poches et même de véritables fontis venant jusqu'au pavage. On était, par suite, obligé de laisser beaucoup de bois, sans cependant pouvoir éviter les tassements de la chaussée. Aussi l'entrepreneur se décida-t-il, en montant le blindage, à placer derrière les couchis des feuilles de tôle mince d'un 1/2 mm. d'épaisseur. Ces feuilles, quand on enlevait les couchis de blindage, étaient évidemment trop faibles pour supporter la poussée des terres, mais elles empêchaient le sable de couler et firent cesser complètement les excavations. Au début, quelques-unes de ces feuilles furent entraînées pendant l'avancement du bouclier: aussi prit-on soin de les replier sur le bord, de manière à ce qu'elles fussent prises entre les extrémités des couchis. Avec cette précaution, les entraînements devinrent extrêmement rares. On employa 1 261 feuilles de $100 \times 100 \times 0,0005$ et 13 546 feuilles de $0,80 \times 1,05 \times 0,0005$; ces dernières plus larges permettaient d'exécuter le rebord dont il vient d'être parlé.

L'exécution de la partie basse, tant comme déblai que comme maçonnerie, s'est faite par les méthodes anciennes, et il n'y a pas lieu d'en parler ici.

Organisation générale du chantier. — Les déblais, jetés sur le transporteur, tombaient dans des wagons amenés immédiatement derrière le bouclier. Ces wagons, formés en train, étaient emmenés directement à la décharge par deux locomotives à vapeur jusque dans une île submersible de la Seine, un peu en aval du pont de Clichy. L'entrepreneur avait obtenu du propriétaire l'autorisation de déposer 60 000 m³ dans cette île, de manière à la relever au-dessus du niveau des crues. Il avait, à cet effet, percé, entre l'extrémité aval du collecteur et la berge, une galerie de service boisée, et jeté une passerelle en bois sur la Seine.

L'exécution de cette galerie, de 3,50 m. de hauteur sur 3,00 m. de largeur, fut achevée sans incident, quoiqu'en certains points il ne reste que 0,15 m. entre la chaussée et les planches de blindage.

Les matériaux nécessaires pour la confection des maçonneries, sable, meulière, ciment, etc., amenés par bateau jusqu'à une estacade de débarquement, établie un peu en amont du pont, étaient déchargés à l'aide d'un transporteur Temperley, qui les transbordait directement sur wagonnets sans aucune reprise. De là, ils pouvaient être dirigés immédiatement sur le lieu d'emploi ou mis en dépôt dans un terrain occupé par l'entreprise. Dans ce même terrain se trouvaient les ateliers et magasins de l'entreprise, ainsi que l'usine productrice d'électricité. Cette usine, d'une force de 50 chev., comprenait deux dynamos, une Gramme et une Edison, débitant chacune 80 amp. avec une tension de 220 volts, actionnées par deux locomobiles, une Weyher et Richmond de 25 à 30 chev. et une Rouffet de 15 à 20 chev.

La dynamo Gramme fournissait le courant : 1° au transporteur Temperley, qui absorbait par intermittences 50 à 60 amp.; 2° à une pompe élévatoire pour le service des ateliers nécessitant à intervalles éloignés 15 à 20 amp.; 3° au malaxeur servant à la fabrication du mortier dont la consommation moyenne était de 15 à 20 amp.; 4° à deux séries de 4 lampes à arc pour l'éclairage du chantier demandant ensemble 36 amp. La marche de ces divers appareils était réglée de manière à ne pas excéder le débit normal de la dynamo.

La dynamo Edison était spécialement affectée au service du souterrain, au moyen d'une ligne composée de deux fils nus de 0,012 m. montés sur isolateurs. Les appareils branchés sur ces lignes étaient : 1° la dynamo de 5 chevaux actionnant les pompes du bouclier avec un courant de 15 à 20 amp.; 2° la dynamo du transporteur de même force; 3° l'éclairage au moyen d'une cinquantaine de lampes à incandescence exigeant ensemble 15 amp.; 4° une dynamo de 10 chev., 34 amp. actionnant un ventilateur Farcot, pouvant débiter, à la vitesse de 1 500 tours à la minute, 20 000 m³ d'air frais pris au dehors. Le débit de tous ces appareils, surtout en tenant compte des pertes de ligne dans un milieu humide, est supérieur à celui de la dynamo génératrice. Mais,

quand le bouclier était en marche, le transporteur était au repos et on pouvait au besoin arrêter le ventilateur.

Marche du travail. — *Travaux préliminaires.* — L'entrepreneur, qui n'avait qu'un très court délai d'exécution, profita, de ce qu'à l'extrémité aval, la couche de terre au-dessus de la voûte était plus épaisse, pour commencer le travail sur bois pendant que l'on construisait le bouclier. Il exécuta ainsi, du 10 août au 2 décembre 1895, 453 m. de voûte, soit un peu moins de 3,00 m. par jour.

Pour arriver à cet avancement, il fallut employer 3 équipes de huit heures et obtenir des ouvriers par des primes un travail exagéré.

Pendant ce travail sur bois, on observa deux tassements successifs de la chaussée, l'un au moment de l'abatage et l'autre au décintrement. Le tassement total était au minimum de 0,06 m., et rien ne prouve, en raison de la grande quantité de bois abandonné, derrière les maçonneries, que ces tassements ne continueront pas. Il a été en effet abandonné sur ce parcours 15 733 m. linéaires de planches en sapin de 0,041 m. et 4 964 m. linéaires de bastaings de 0,08 m. $\times$ 0,16 m., soit en moyenne 46 m. linéaires de planches ou un 1/2 m^3 de bois par mètre courant.

Pendant l'exécution avec le bouclier, on dut laisser encore des planches, tant qu'on n'eut pas recours aux feuilles de tôle, mais, après cette amélioration, la perte fut insignifiante. On abandonna en moyenne 0,054 m^3 par mètre courant. Encore cette perte est-elle due, non pas au bouclier, mais à l'exécution des maçonneries.

Mise en place du bouclier. — Pour construire et mettre en place le bouclier sans interrompre ni gêner la circulation, on profita d'un carrefour. On y fit une fouille boisée parallèle au boulevard National, que l'on descendit jusqu'au niveau des naissances et dans laquelle on construisit le bouclier. Le montage fait par la maison Augé fut commencé le 21 novembre et terminé le 8 décembre.

Pendant ce temps, on avait ouvert latéralement sous la chaussée du boulevard une galerie boisée à l'emplacement du collecteur,

dans laquelle le bouclier pouvait être mis en place en le ripant parallèlement. Cette opération fut faite de nuit de une heure à sept heures du matin pendant l'arrêt des tramways, le 10 et le 11 décembre ; et le 12, on pouvait faire les essais de mise en marche.

Période de mise en train. — Pendant les trois premiers mois le travail fut très irrégulier, il fallut arrêter à diverses reprises pour modifier l'appareil et faire l'apprentissage des ouvriers. On dut remplacer successivement les vérins qui se brisèrent tous. Du 19 au 26 décembre, on changea, comme il a été expliqué, les poutres transversales, qui gênaient l'évacuation des déblais. Du 31 décembre au 21 janvier, on allongea l'avant-bec et on remplaça les pompes à bras par les compresseurs mus électriquement. Enfin du 15 au 23 mars, on installa le transporteur.

Néanmoins l'avancement moyen fut de 2,50 m. pendant ces cent deux jours de tâtonnement et, si l'on déduit les arrêts dus à la transformation de l'outil, de 3,90 m., c'est-à-dire bien supérieur à l'avancement avec la fouille boisée.

Travail normal. — Pendant la période de travail normal, qui s'étendit du 23 mars au 30 octobre 1896, le bouclier parcourut en deux cent vingt et un jours 997 m. avec un avancement moyen de 4,51 m. Mais pour faire une comparaison complète avec les travaux antérieurs où le travail s'effectuait sans aucun arrêt, il faudrait déduire trente-huit jours d'arrêts dus au payes, à des inondations à la suite d'orages, etc., toutes causes indépendantes du travail, de sorte que l'avancement moyen, par 24 heures, ressort à 5,45 m.

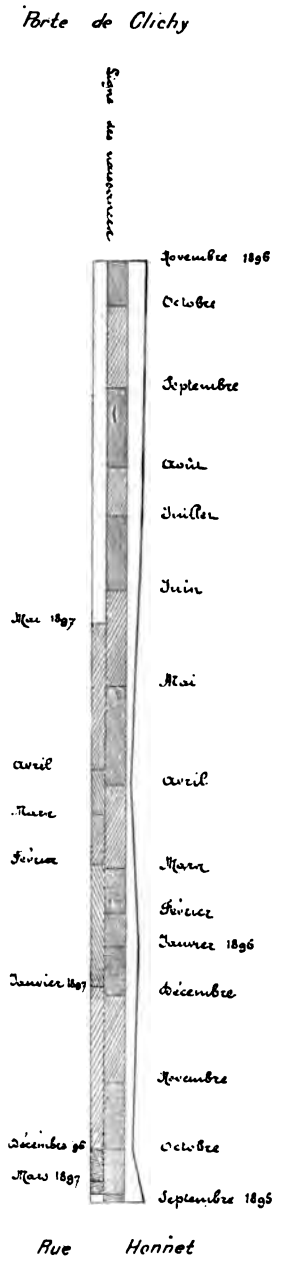


Fig. 302. — Profil d'avancement.

L'avancement moyen par mois est indiqué sur le profil (fig. 302).

L'avancement atteignit plusieurs fois 9,10 m. dans une journée de vingt-quatre heures.

Principaux incidents. — A deux reprises, on traversa des sables argileux mous, et, en raison de la faible surface d'appui des

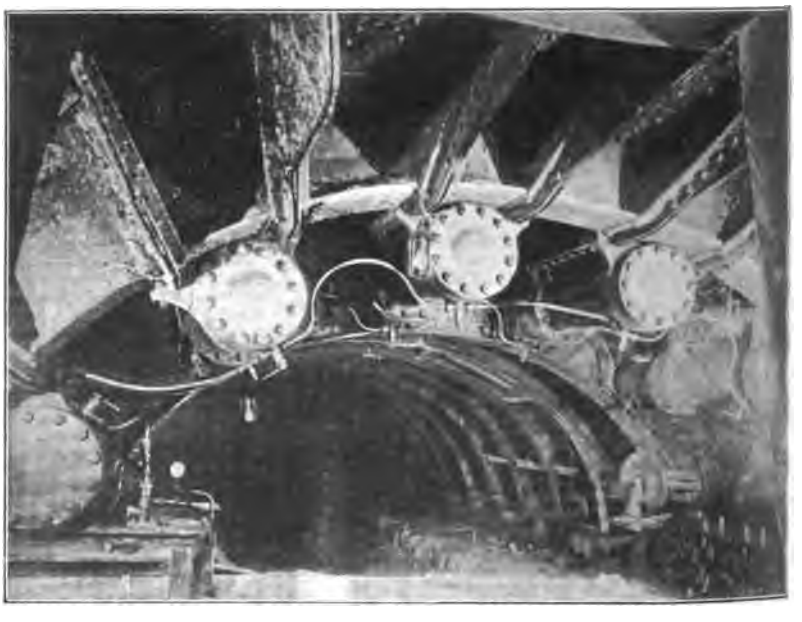


Fig. 303. — Vue du bouclier après l'achèvement du travail.

longerons, il fallut battre des pieux sous les semelles et on ne put éviter un enfoncement d'environ 0,15 m. du bouclier.

L'avancement fut arrêté plusieurs fois, ou tout au moins retardé par de gros blocs de grès noyés dans les sables, de vieilles maçonneries, d'anciens égouts, etc. Comme le couteau était constamment enfoncé dans le sol, on ne voyait pas toujours les obstacles et, si les ouvriers n'observaient pas avec soin le manomètre, qui les avertissait d'une résistance anormale, le couteau était faussé; la réparation en était d'ailleurs facile.

On rencontra, sur 50 m. environ, un banc de pouddingue très dur qui ralentit la marche; parfois on eut affaire à des sables

secs, fins et coulants et, en raison de la grande hauteur du front d'attaque, il se produisit quelques glissements, qui déterminèrent des tassements de la chaussée. Le moindre vide, laissé sur le flanc, causait le long de la surface lisse de l'enveloppe un tassement qui venait au jour. Néanmoins, même dans ces passages difficiles, jamais la circulation ni le passage des tramways ne fut arrêté.

Il est certain qu'avec un terrain aussi ébouleux, il aurait fallu fractionner en deux étages le front de taille, et peut-être mettre des cloisons verticales qui auraient été bien moins encombrantes que les poutres elliptiques.

Etat du bouclier. — A la fin de ce long parcours de 1 255 m., le bouclier était encore en bon état ; la figure 303 le représente tel qu'il était, après l'achèvement du travail et l'enlèvement du transporteur. On aperçoit à droite les pompes et à gauche le réservoir d'eau.

La poutre mobile était seul disloquée ; mais elle ne servait ni à soutenir la queue du bouclier, ni à reporter l'effort sur les cintres ; il eût mieux valu, pour ces derniers, que les tiges des vérins fussent munies de larges patins. Son seul usage était de soutenir le faux chapeau pendant l'exécution du blindage, et il eût été facile d'imaginer un autre dispositif.

Tassements. — En dehors des incidents dont il a été parlé, il y a eu un tassement normal de 0,06 m. comme pour l'exécution de la voûte sur bois ; à savoir 0,03 m. au moment de l'échappement de la queue du bouclier, et un autre analogue au tassement des cintres pendant l'exécution de la maçonnerie.

A la fin, les tassements s'aggravèrent par suite du mauvais état des cintres ; ils s'étaient déformés sous la poussée des vérins, appliquée seulement, sur le diamètre de leurs tiges, au lieu d'être largement répartie ; les trous de boulons des éclisses s'étaient ovalisés et avaient pris du jeu ; mais ces défauts auraient pu être facilement corrigés.

Enfin, on l'a vu, dans les terrains ébouleux, les petites excavations laissées sur les flancs du bouclier étaient masquées par les

plaques de tôle du blindage, et il était impossible de les bourrer. L'exécution tardive de la maçonnerie n'a pas permis de recourir à l'injection qui eût obvié complètement à cet inconvénient inévitable.

On a eu l'occasion ultérieurement pendant l'exécution de la partie basse, dans une partie de voûte, qui avait tassé à la suite d'une forte crue de la Seine d'essayer l'injection, et on a reconnu qu'en employant du mortier de Portland les moindres cavités étaient bouchées. On est d'autant plus certain que, si l'on avait pu l'employer pendant toute la durée du travail, on eût supprimé tout tassement, que jamais, en marche normale, on n'a constaté de mouvements dans la chaussée qu'à une distance de 5 à 10 m. en arrière du bouclier.

Conclusions. — En résumé, le travail du collecteur Clichy extra muros marque la transition entre l'emploi du bouclier avec le revêtement métallique et son application à la construction d'une voûte en maçonnerie. Il a permis de constater que l'emploi d'un blindage intermédiaire était une dépense inutile et empêchait de procéder à l'injection, qui, seule, eût évité tout tassement.

Il a établi, par contre, la possibilité d'exécuter, rapidement et sans accident, un ouvrage important sous une voie publique, à une faible profondeur, sans gêner la circulation, à condition, bien entendu, de prendre les précautions nécessaires pour protéger les conduites ou les galeries voisines qui sont soumises à une forte pression, au moment du passage du bouclier.

A ce titre, il est d'une haute importance, et on ne saurait s'attarder à des critiques de détail.

CHAPITRE XIII

COLLECTEUR DE CLICHY INTRA MUROS

(1896-1897)

Exposé. — Ce travail est la suite du précédent et comprend la construction du collecteur à l'intérieur de Paris, entre les fortifications et la place de la Trinité.

D'après les sondages on savait que le souterrain serait ouvert dans les marnes de Saint-Ouen, les sables de Beauchamp et le calcaire grossier et que la traversée des sables s'étendrait sur environ la moitié du parcours. L'expérience des travaux du collecteur d'Asnières avait montré que ces sables étaient noyés dans une nappe d'eau et ne pouvaient être attaqués qu'après un assèchement préalable. Pour éviter des épuisements onéreux et tout encombrement de la voie publique, les ingénieurs de l'Assainissement imposèrent aux entrepreneurs de ne faire qu'une seule attaque près des fortifications et de s'en servir pour faire passer tous les déblais et tous les matériaux.

En raison de la grande profondeur à laquelle devait se trouver l'ouvrage, il ne parut pas nécessaire de procéder, comme pour la partie extra muros, à un concours sur les procédés d'exécution et on se borna à n'admettre à l'adjudication que des entrepreneurs ayant une grande expérience des souterrains. Quoique le prix de 1130 fr. par mètre, fixé par le bordereau fût peu élevé et laissât à la charge de l'entrepreneur tous les travaux d'assèchement et l'amenée des eaux à un puisard unique à l'entrée du souterrain, quoique l'on imposât à l'adjudicataire l'obligation d'exécuter les 2500 m. de souterrain dans le délai très court de deux ans, MM. Fougerolle frères furent déclarés adjudicataires avec le rabais

énorme de 31,90 p. 100, ce qui ramenait le prix du mètre courant à 769,55 fr. L'écart avec leurs concurrents était considérable.

Ces entrepreneurs s'empressèrent de faire connaître qu'ils n'avaient fait ce rabais que parce qu'ils espéraient obtenir une exécution à la fois rapide et économique par une nouvelle application de la méthode du bouclier.

Le bouclier (fig. 304 et 305). — Le bouclier de M. Chagnaud

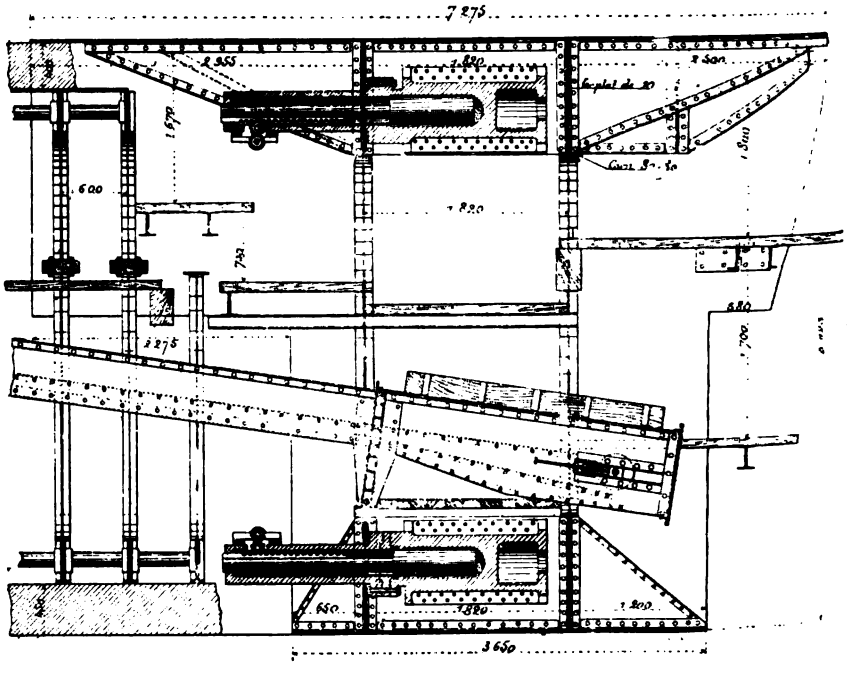


Fig. 304. — Coupe longitudinale du bouclier.

était une forme de transition avec laquelle on avait conservé l'exécution de la voûte avant celle de la partie basse, à l'abri d'un boisage. M. Fougerolle, un an seulement après, s'est affranchi résolument de ces dernières sujétions et a fait construire un bouclier permettant d'exécuter la fouille sur toute la section et de monter la maçonnerie à l'abri même du bouclier sans l'intermédiaire d'aucun boisage.

L'enveloppe se compose de tôles d'acier de 14 mm. d'épaisseur

complètement lisses à l'extérieur et doublées à l'intérieur sur tous les joints par de larges plats de même épaisseur. Dans la partie centrale, sur 3,65 m. de longueur, cette enveloppe épouse la forme elliptique de l'ouvrage ; elle a 5,92 m. de hauteur et 7,278 m. de largeur. Dans l'avant-bec, cette enveloppe se prolonge au sommet sur 1,35 m. de longueur, est découpée en visière sur 2,79 m. de hauteur et 0,77 m. de longueur et se raccorde par une partie hori-

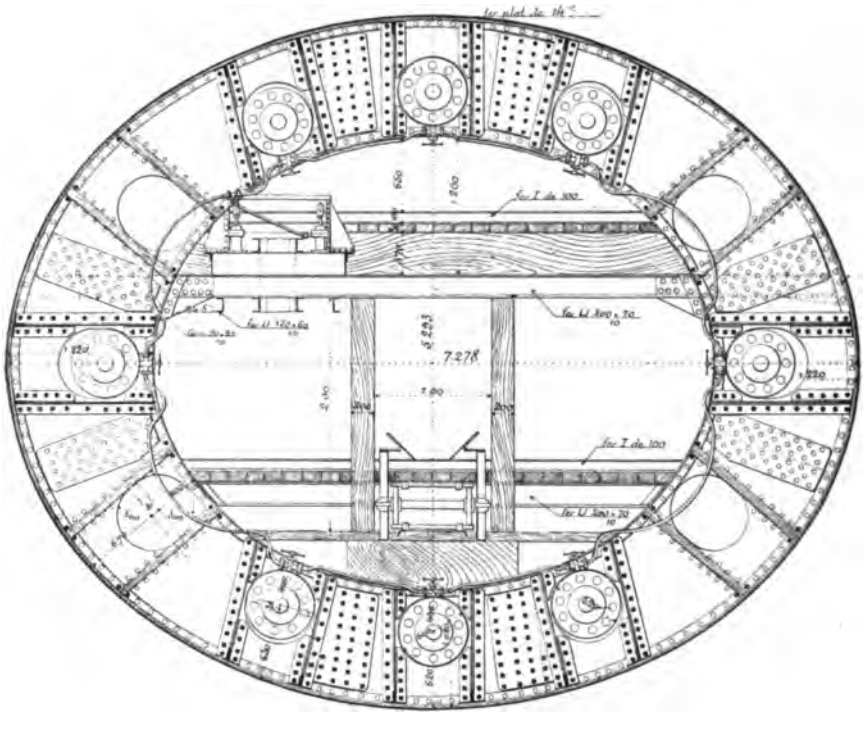


Fig. 305. — Vue arrière du bouclier.

zontale de 0,58 m. de longueur avec le reste de l'enveloppe, tandis que la partie inférieure est totalement supprimée. Dans la queue, sur une longueur de 2,275 m. l'enveloppe n'existe que sur la même hauteur de 2,79 m., est coupée par des plans verticaux et horizontaux et manque dans la partie inférieure.

Comme dans le bouclier précédent, l'enveloppe est soutenue, dans la partie centrale, par deux grandes poutres elliptiques formées d'une âme en tôle de 10 mm. d'épaisseur et de 4 cornières 80 ×

80 × 10. Ces poutres ont 1,02 m. de hauteur sur l'axe vertical et 1,22 m. sur le diamètre horizontal. Elles sont réunies entre elles par 12 couples d'entretoises longitudinales de même hauteur formées d'une âme de 10 mm. d'épaisseur et assemblées avec l'enveloppe et avec les poutres par des cornières 80 × 80 × 10. Entre chacun de ces couples d'entretoises, la poutre-arrière est percée d'un trou pour le passage des vérins, au nombre de 12. Pour compenser l'affaiblissement qui en résulte, cette poutre est renforcée, dans les autres intervalles, par des fourrures de 10 mm. d'épaisseur.

Les entretoises ne sont pas également espacées ni posées exactement suivant des plans diamétraux mais groupées, de manière à rapprocher les vérins par couples de 3 des extrémités des diamètres horizontaux et verticaux. En fait, on n'a placé que les 6 vérins correspondant au diamètre vertical et un à chaque extrémité du diamètre horizontal, soit 8 en tout. Les 4 autres vérins et les 4 couples d'entretroises correspondants n'ont pas été montés ; on s'est contenté de remplacer les entretoises manquantes par des bois, comme l'indique la figure 305.

Les deux grandes poutres ne sont espacées que de 1,82 m. d'axe en axe, et par suite, l'enveloppe elliptique s'étend à 0,65 m. à l'arrière et à 1,20 m. à l'avant.

Dans l'avant-bec, la partie de l'enveloppe en saillie formant trousse coupante est renforcée par de forts goussets, faisant suite aux entretoises et de même construction. Dans la partie basse se terminant par un plan vertical, ces goussets, au nombre de six, correspondant aux six entretoises posées, se composaient d'une âme triangulaire, en tôle de 10 mm. d'épaisseur, réunie à l'enveloppe et à la poutre d'avant par des cornières 80 × 80 × 10, et bordée, suivant son arête sur chaque face par des cornières plus faibles. Deux des goussets, correspondant aux entretoises qui encadrent les vérins placés sur le diamètre horizontal, sont construits de même. Dans la partie supérieure formant visière, et dont la saillie maxima sur la poutre avant est de 2,55 m. les goussets sont au nombre de huit. Les deux plus bas et les quatre placés symétriquement par rapport à l'axe vertical offrent, sur une longueur de 0,90 m., une partie rectangulaire qui n'est que le prolonge-

ment des entretoises et sont construits avec des matériaux de mêmes dimensions. Au delà et rattachée à elle par quatre cornières 80 × 80 × 10 placées sur chaque face par deux dos à dos se trouve une partie triangulaire analogue à celle du bas. Seulement l'extrémité en est coupée à 0,30 m. du couteau par un plan vertical et sur la cornière du bord à une distance de 0,10 m. de l'enveloppe est rivée un fer U. On peut ainsi engager entre l'enveloppe et ce fer des palplanches pour allonger la visière, quand la nature du terrain l'exige. Les deux goussets, qui encadrent le vérin du milieu diffèrent légèrement des précédents. Pour les facilités du service ils sont triangulaires.

La queue du bouclier est soutenue par des goussets en même nombre et de même construction qu'à l'avant-bec. Dans la partie en saillie au-dessus des naissances, ces goussets triangulaires s'arrêtaient primitivement à 1,15 m. de l'arête. Mais quoique l'enveloppe fût, dans toute l'étendue de la partie nue, composée d'une façon continue de 2 tôles de 14 mm. d'épaisseur, on s'aperçut qu'au sommet elle avait une tendance à fléchir et on a prolongé les deux goussets du sommet jusqu'à 0,50 m. de l'arête.

La hauteur du bouclier est divisée, dans chacune des trois parties, par des planchers placés à des hauteurs différentes. Dans l'avant-bec, les planchers, au nombre de deux, partagent la chambre de travail en trois étages sensiblement de même hauteur. Les planchers, formés de madriers reposent sur des fers boulonnés au bouclier. Ils sont en retraite de 0,70 m. l'un par rapport à l'autre. Dans le corps, et sur 1,20 m. au delà de la grande poutre d'arrière, se trouve un plancher solidement construit et destiné à porter les dynamos et les pompes d'alimentation des vérins. L'encombrement causé par les grandes poutres et les entretoises a obligé à baisser ce plancher à 0,55 m. en contre-bas du plancher supérieur de l'avant-bec, de sorte qu'il ne se trouve qu'à une faible hauteur au-dessus du diamètre horizontal. Dans la queue, il n'existe qu'un plancher unique, destiné aux maçons occupés à la construction de la voûte; il s'étend à 2 m. au delà de la poutre d'arrière et est porté par deux poutres en fers à T boulonnées à l'enveloppe. Il est placé à une hauteur suffisante pour permettre aux ouvriers de travailler aisément jusqu'au sommet de la voûte.

On peut voir déjà que les grandes poutres elliptiques ne laissent que des passages assez étroits pour communiquer d'un plancher à un autre.

Les cintres. — Les cintres (fig. 306) servent tout à la fois de

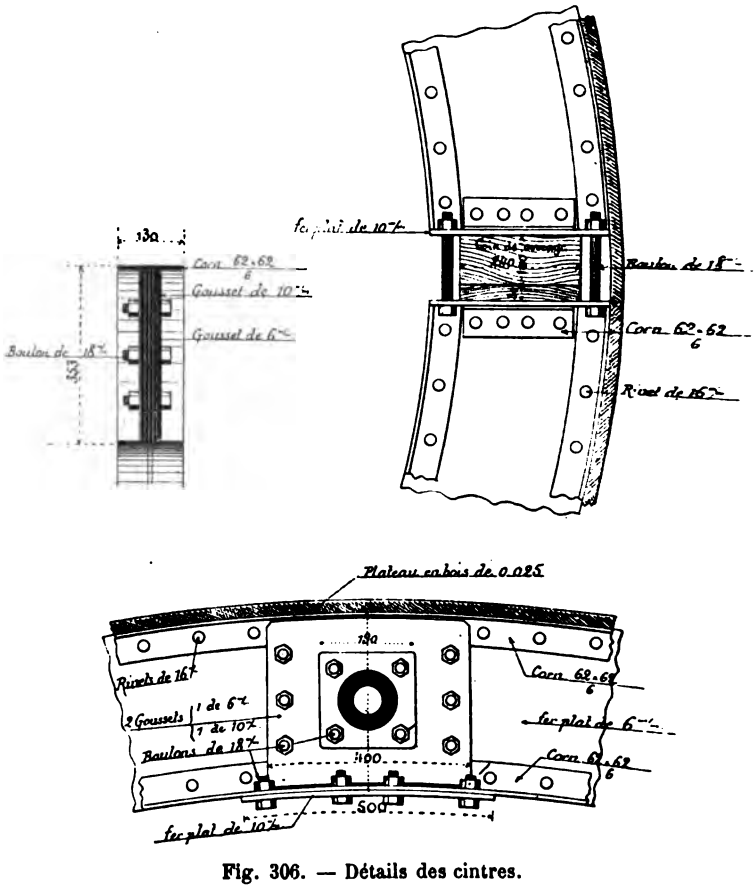


Fig. 306. — Détails des cintres.

points d'appui pour les vérins et de supports pour l'exécution de la voûte. Ils sont formés de quatre pièces et ont une âme de 6 mm. d'épaisseur et 0,353 m. de hauteur, bordée par 4 cornières 62 × 62 × 6. Les deux morceaux inférieurs s'élèvent un peu au-dessus des naissances et s'assemblent aux deux morceaux supérieurs par 4 boulons de 18 mm. Pour permettre le décintrement,

on intercale entre les abouts formés d'une tôle de 10 mm. des coins de 0,24 m. de largeur.

Les joints des deux morceaux inférieurs ou supérieurs se font au moyen d'éclisses de 10 mm. d'épaisseur et de boulons ; on place une éclisse sur chaque face et une sur la semelle inférieure. En face du point d'appui de chaque vérin l'âme des cintres est renforcée des deux côtés par un gousset de 6 mm. d'épaisseur percé de 4 trous pour le passage des boulons d'assemblage des entretoises.

Ces entretoises travaillant à la compression, on a substitué avec raison aux fers à T, employés hors Paris, des pièces de fonte. Ces entretoises (fig. 306 et 307) se composent d'un cylindre creux de 0,12 m. de diamètre extérieur et 0,06 m. de diamètre intérieur et se terminent par des embases carrées de 0,05 m. d'épaisseur percées de 4 trous pour les boulons d'assemblage. Elles ont une longueur de 0,56 m. correspondant à un écartement des cintres de 0,60 m.

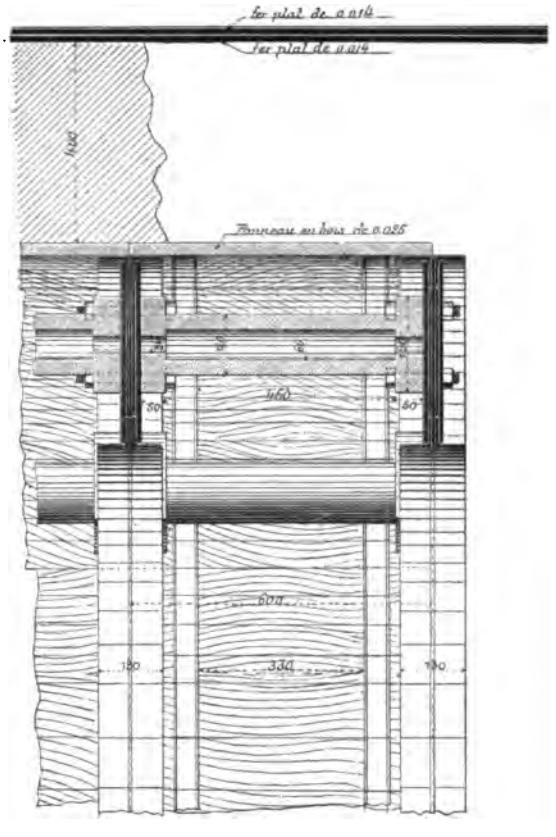


Fig. 307.
Coupe longitudinale des cintres.

Pour éviter que ces cintres ne reculent sous la poussée des vérins, on a eu recours à des ancrages (fig. 308). Une lame en fer plat de 10 mm. d'épaisseur est scellée dans la maçonnerie et reliée à une entretoise par un collier et des boulons de 20 mm. Ces ancrages sont placés tous les quatre cintres ; mais ils ne sont mis en service et les boulons serrés à fond qu'un peu en arrière,

dans la partie où les mortiers ont fait une prise suffisante. Grâce aux entretoises et à ces ancrages, les 30 cintres en service forment une masse capable de résister à la poussée des vérins.

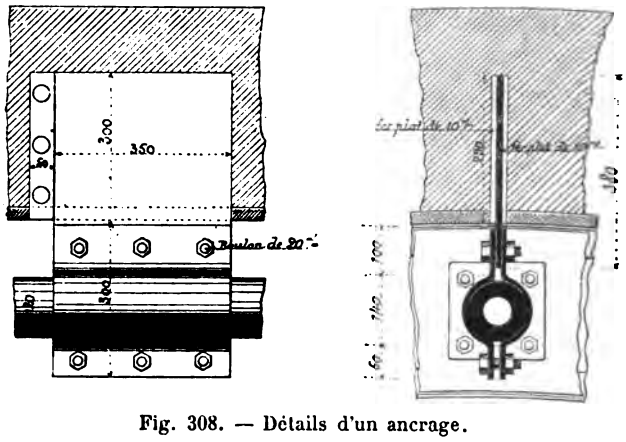


Fig. 308. — Détails d'un ancrage.

Pour l'exécution de la voûte, les cintres reçoivent, au lieu de couchis, des panneaux en planches de 25 mm. assemblés sur deux fers U, 50 × 25 × 6, et recouverts d'une tôle mince (fig. 309).

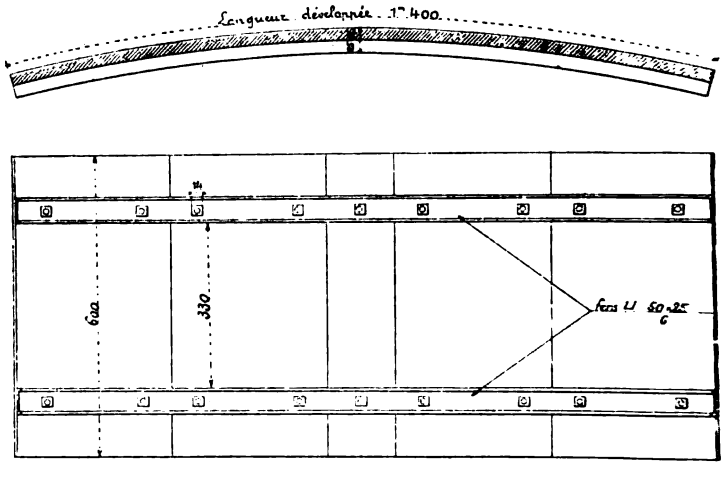


Fig. 309. — Détails d'un panneau.

La figure 310 représente un cintre complet. On peut remarquer que les entretoises correspondant aux vérins sont très inégale-

ment espacées. Les trois entretoises du haut et du bas sont à 1,50 m. l'une de l'autre tandis que les entretoises, placées sur le diamètre horizontal, sont à 2,60 m. de l'entretoise la plus voisine. Il en résulte que les cintres travaillent très inégalement et doivent avoir une tendance à se déformer.

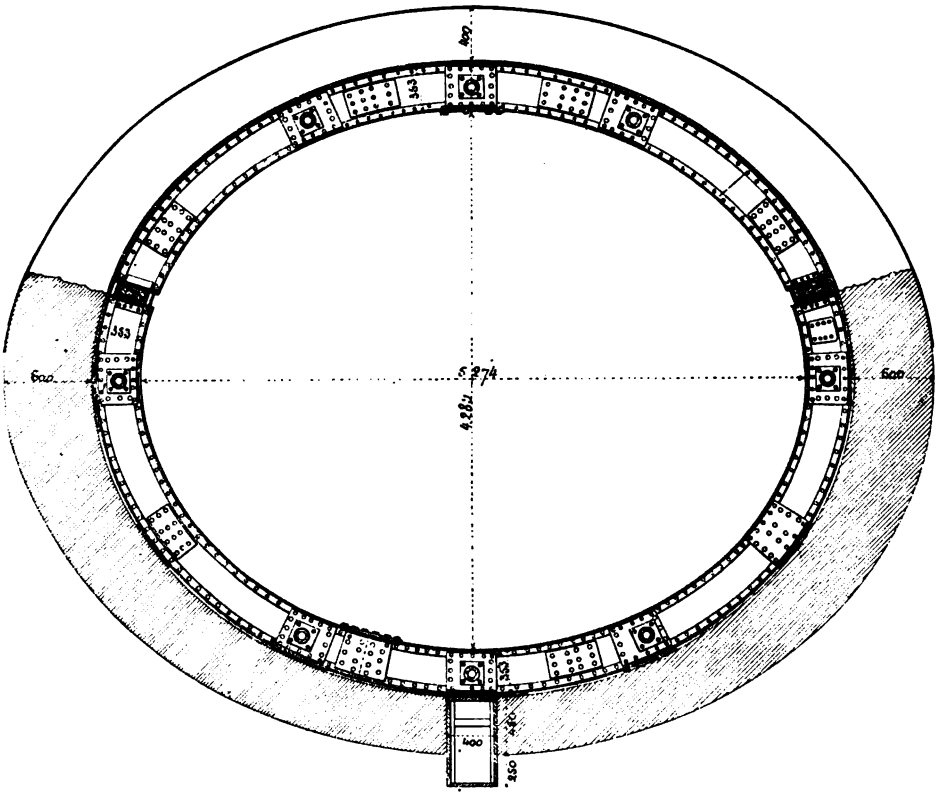


Fig. 310. — Elévation d'un cintre complet.

Vérins. — Les vérins sont d'une construction analogue à ceux de la partie extra muros. Toutefois, comme leur rôle se borne à faire avancer le bouclier et qu'ils n'ont pas à ramener de poutre mobile, ils sont à simple effet et leur tige, protégée et guidée par une enveloppe en fonte, porte une crémaillère qui permet, à l'aide d'un pignon et d'une manivelle, de les ramener en arrière. Les cylindres avaient été faits primitivement en fonte ; mais ces pièces fort lourdes de 0,13 m. d'épaisseur étaient difficiles à fabriquer et

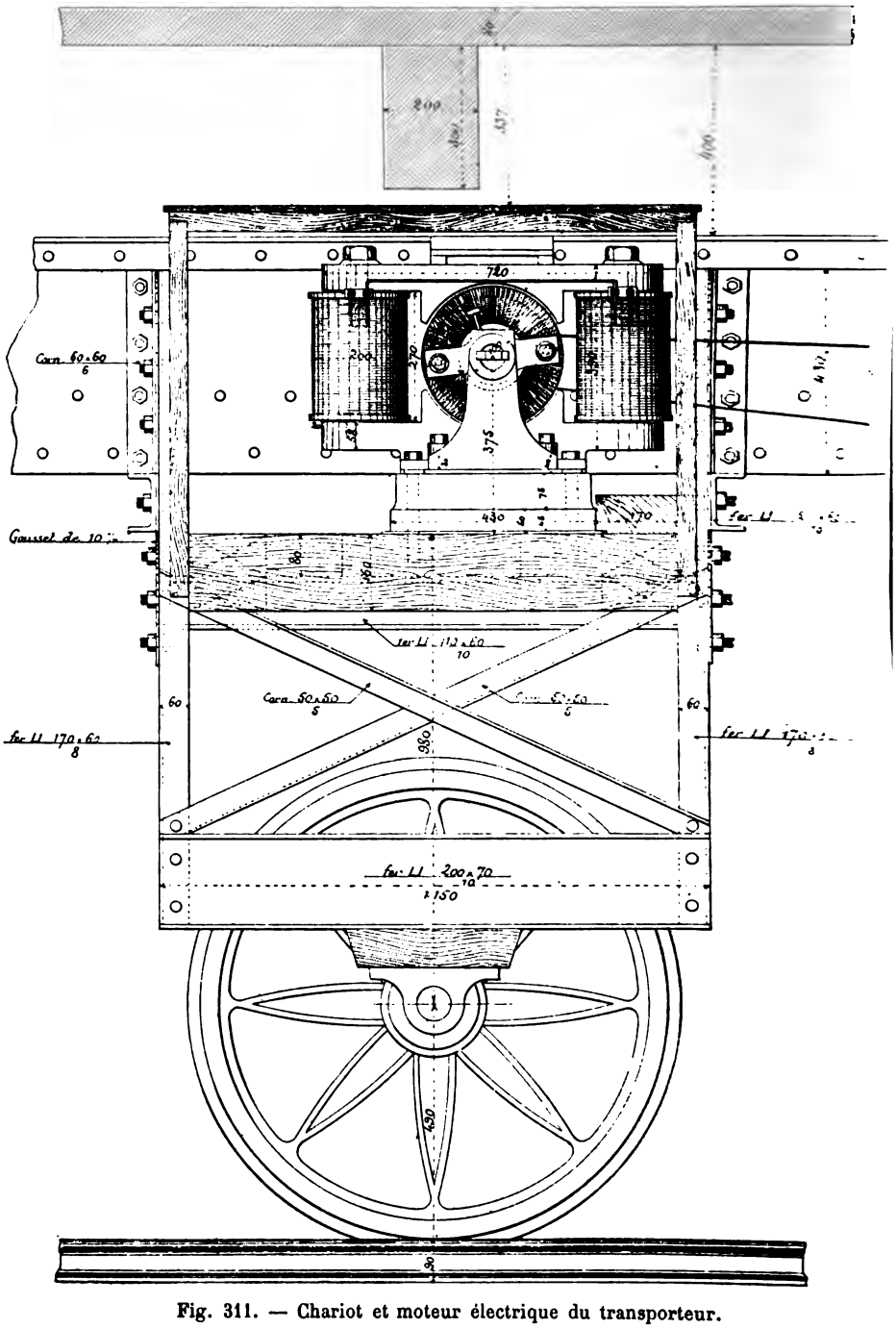


Fig. 311. — Chariot et moteur électrique du transporteur.

défectueuses : on a dû les remplacer par des cylindres en acier fondu, qui ont subi avec succès un essai de 460 kg. de pression par centimètre carré.

Les pompes sont analogues à celles de l'extérieur mais plus fortes ; elles sont actionnées par deux dynamos de la Société

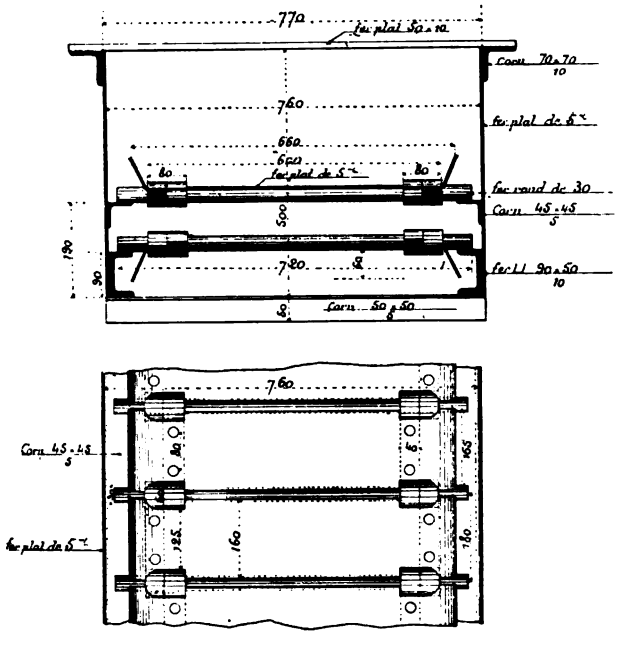


Fig. 312. — Coupes verticale et horizontale du transporteur.

Alsacienne G 5 à carcasse fermée, de 4 amp. 440 volts. La consommation moyenne de courant, pour un avancement du bouclier de 0,60 m. est de 1 836 watts.

Le transporteur. — L'exécution de la maçonnerie dans le bouclier même n'était possible qu'en assurant un moyen rapide et simple d'évacuation des déblais. On a installé dans ce but un transporteur mécanique. Cet appareil est attaché d'un bout au bouclier (fig. 304) et repose à l'autre sur un chariot (fig. 311). Tout l'ensemble est ainsi entraîné automatiquement par le bouclier.

Ce transporteur a 25 m. de longueur et est placé à une hauteur telle que l'on peut garer au-dessous tout un train de wagonnets

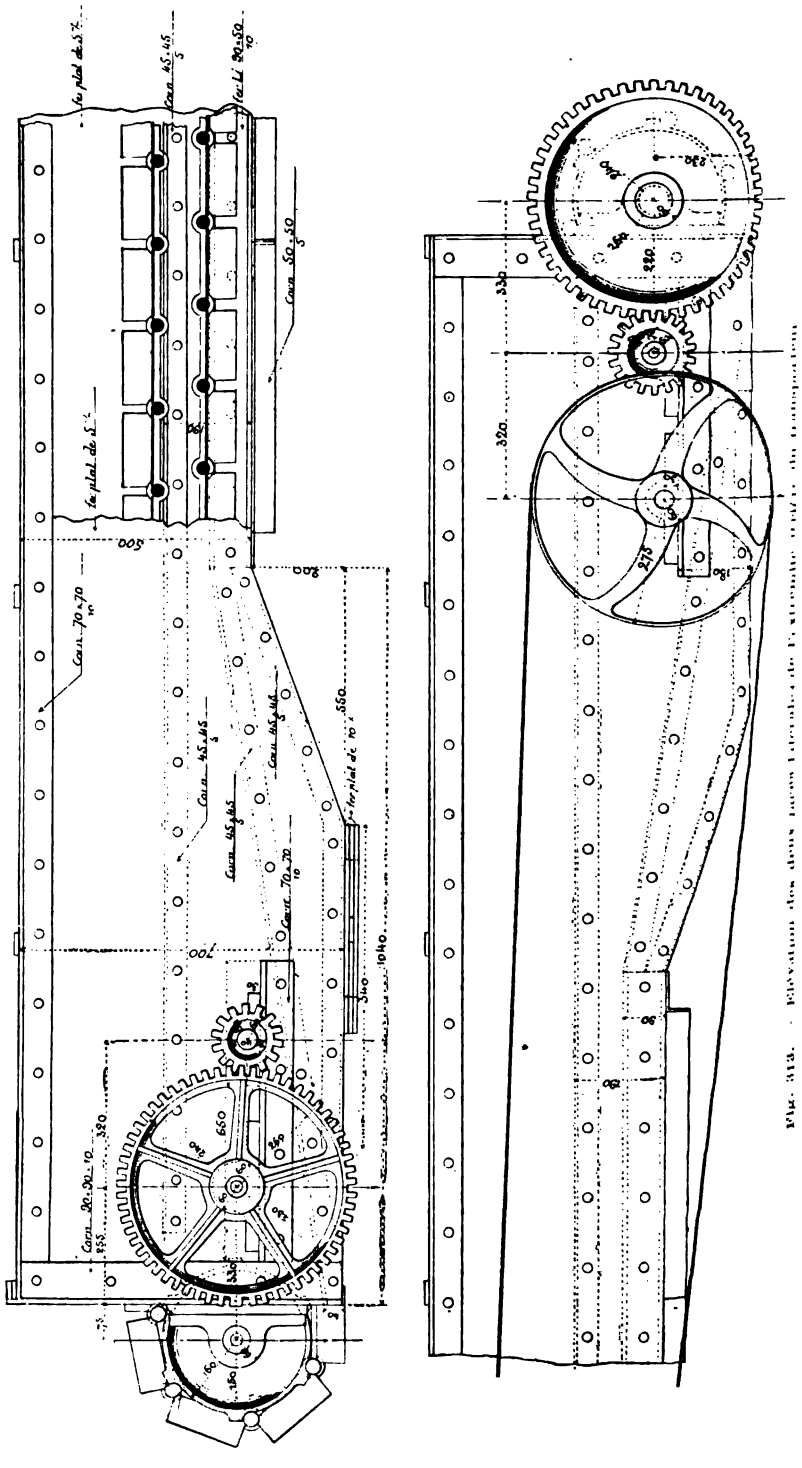


Fig. 313. — Bouclier [illegible]

qui viennent se faire charger successivement. Il n'y a d'autres arrêts dans le fonctionnement que ceux nécessaires pour enlever une rame de wagons pleins et amener une rame de wagons vides.

Il se compose essentiellement de deux flasques en tôle de 5 mm. renforcées en haut par des cornières 70 × 70 × 10, entretoisées en haut par des fers plats de 50 × 10 et en bas par des cornières 50 × 50 × 15 et espacées de 0,77 m. A l'intérieur se trouvent

Fig. 314. — Chargement des wagons à l'aide du transporteur.

deux glissières ; celle du haut est formée par des cornières 45 × 45 × 5 et celle du bas par des fers U 90 × 50 × 10 (fig. 312). Les terres sont transportées sur une chaîne sans fin formée de tôles de 5 mm. d'épaisseur, 0,16 m. de longueur et 0,60 de largeur à bords relevés. Ces tôles sont réunies par de longs boulons de 30 mm. de diamètre dont les bouts portent sur les glissières. Aux extrémités, ces boulons viennent s'engager dans des entailles ménagées sur les angles d'un tambour octogonal. A l'extrémité arrière (fig. 313), le tambour est entraîné par un train d'engre-

nages et une courroie que commande une dynamo installée sur le chariot (fig. 311). Cette dynamo est d'une force de 12 chev. et d'un débit de 13 amp. 440 volts. Elle consomme en moyenne 106 080 watts par jour. Les terres tombent directement de la chaîne dans les wagonnets placés au-dessous (fig. 314).

A l'extrémité avant (fig. 304), les déblais sont jetés directement de l'étage du milieu; ceux de l'étage supérieur y arrivent par une goulotte; pour l'étage inférieur, les terres sont d'abord jetées sur un plancher établi sur les poutres elliptiques du bouclier, puis reprises à la pelle et jetées sur le transporteur.

La roue octogonale d'avant est montée sur un axe, qui peut être avancé ou reculé à l'aide de vis (fig. 304), de manière à donner à la chaîne une tension convenable.

Assainissement. — L'assainissement est assuré par une goulotte boisée (fig. 310) de 0,40 m. de largeur descendant à 0,25 m. au-dessous du radier. Cette goulotte amène toutes les eaux dans un puisard unique de 3,00 m. de diamètre, placé à l'extrémité aval. Les eaux sont reprises dans ce puisard et rejetées à 7 m. de hauteur dans un égout, au moyen de pompes. On ne pouvait songer à installer, dans Paris, pour cet épuisement, des machines à vapeur. Les pompes, au nombre de 3, d'une puissance chacune de 90 m³ à l'heure, sont installées dans une chambre souterraine, construite sous le trottoir du boulevard Militaire, et actionnées par des dynamos qui empruntent leur courant au secteur d'éclairage.

Cette installation très simple est absolument silencieuse et très économique. La dépense journalière, tant en main-d'œuvre qu'en fourniture de courant électrique, est en moyenne de 40 fr.; si l'on y ajoute l'amortissement pour deux ans de travail, la dépense par jour s'élève à 60 fr. Malgré cette très faible dépense, on dispose d'une force, largement suffisante et surtout très élastique, se pliant instantanément à toutes les variations du débit des eaux à épuiser.

Plancher et rampe de service. — On vient de voir comment les déblais traversaient le chantier de maçonnerie, sans le gêner, au moyen du transporteur; mais il ne resterait pas sous cet appareil

une place suffisante pour l'approche des matériaux, la fabrication des mortiers, etc. On a dû reporter tout ce service au-dessus, et, à cet effet établir un plancher, environ à hauteur des naissances. Ce plancher (fig. 304) est porté par des poutres traversant le souterrain et est allongé au fur et à mesure de l'avancement du bouclier. On y accède par une rampe (fig. 315) qui se détache de la voie de service à l'arrière ; les wagons de sable, de meulière ou de ciment sont montés sur cette rampe au moyen d'un treuil.

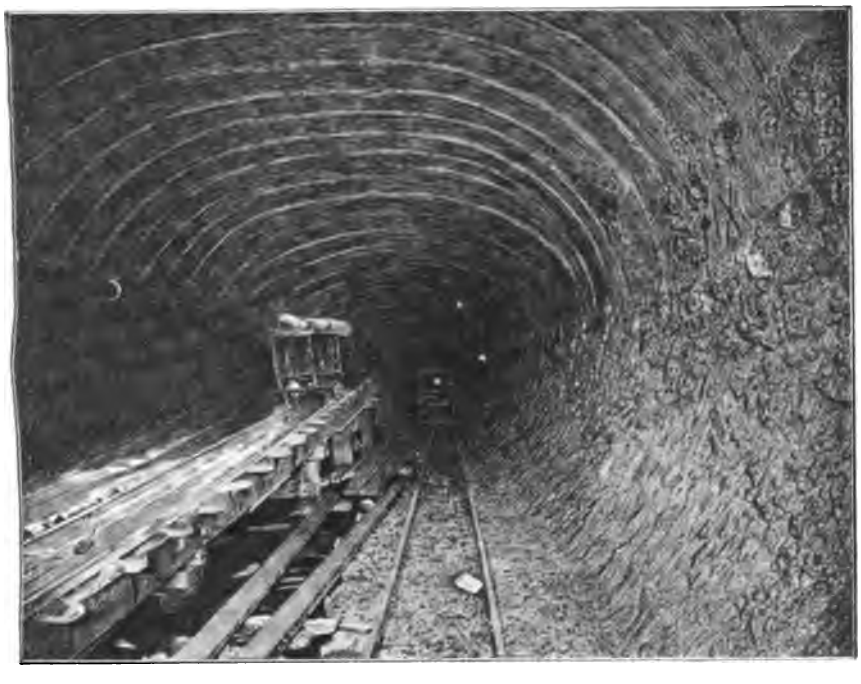


Fig. 315. — Voie de service des déblais et rampe d'accès au plancher des maçons.

Grâce à cette rampe et à ce plancher, l'approvisionnement et le service des maçons sont complètement libres et indépendants du chantier des terrassements. Quand le plancher atteint une longueur de 100 m., on reporte la rampe plus près de l'avancement. Ce déplacement s'effectue pendant les arrêts du travail, généralement les jours de paye.

Il y a là un détail d'organisation des plus remarquables et dont

l'effet sur la bonne marche du travail et la rapidité d'exécution a été très marqué.

Fonctionnement de l'appareil. — L'avancement du bouclier est ici beaucoup plus simple que dans la partie extra muros. Dès que, par l'effet de l'admission de l'eau les tiges des vérins sont venues en contact avec les cintres, le bouclier avance et peut, si le terrassement est préparé, exécuter sa course de 0,60 m. Pendant ce temps la queue glisse entre les terres et la maçonnerie. Pour éviter tout entraînement de la maçonnerie qui a été soigneusement bourrée, il suffit de faire passer une fiche de poseur de pierres entre la queue et la maçonnerie. Cette fiche en même temps permet de bourrer du mortier dans le vide laissé par la queue. Ce bourrage, quoique très imparfait et bien inférieur à une injection, a permis, aux grandes profondeurs où l'on opérait, d'éviter les tassements et l'on conçoit aisément que, si cela était nécessaire, on pourrait le faire d'une façon beaucoup plus parfaite.

Exécution de la maçonnerie. — Si l'on avait voulu exécuter un anneau de maçonnerie de 0,60 m. de longueur, en partant du bas et en remontant jusqu'à la clef, on n'aurait pu y mettre que deux ou quatre ouvriers et on ne serait jamais arrivé à le finir dans le court espace de temps qui sépare deux avancements successifs. On a fractionné et allongé le chantier. Deux ouvriers exécutent, sur 0,60 m. de longueur, le radier dans la partie que vient de mettre à nu le bouclier ; une seconde équipe exécute les piédroits sur un deuxième anneau de 0,60 m. ; enfin une troisième monte la voûte sur un troisième et dernier anneau. Cette voûte est généralement faite, pour aller vite et éviter les tassements, avec trois clavages. L'exécution de la voûte se fait avec la plus grande facilité et dans des conditions que l'on n'avait jamais pu atteindre en souterrain, au point de vue de la bonne exécution du travail et de la surveillance.

Par suite de sa disposition en échelons, le chantier de maçonnerie s'étend sur une longueur de 1,80 m. ou de trois anneaux, et la partie inférieure des cintres peut être montée à 0,60 m. en avant

de la partie supérieure. C'est pour ce motif, comme le montre la figure 304, que les vérins du bas ont leur tige plus courte de 0,60 m.

On doit rappeler encore, comme détail d'exécution des maçonneries, la substitution, aux couchis généralement employés, de panneaux recouverts d'une plaque de tôle. En ayant soin de mettre une épaisse couche de mortier sur ces panneaux avant de placer les moellons de la voûte, on obtient un dégrossissage intérieur de la maçonnerie bien supérieur à celui que l'on fait après coup, et le travail ultérieur de l'exécution de l'enduit se réduira à bien peu de chose.

Avec de la maçonnerie de meulière et du mortier comprenant 350 kg. de ciment de Portland par mètre cube de sable, on obtient une voûte très solide, qui n'a ni mouvement ni fissures au décintrement, et généralement très étanche. Cependant, en un point, on a traversé des terrains absolument bouleversés, un véritable fontis où l'eau venait en abondance. Malgré le renforcement de voûte exécuté, comme il sera expliqué ci-après, l'eau se faisait jour à travers les maçonneries. Tout récemment on a essayé, pour assécher cette maçonnerie, de l'appareil d'injection Greathead. Avec une dépense insignifiante, on a obtenu un succès complet. Cet essai vient compléter celui fait hors Paris et prouve qu'en employant l'injection méthodiquement, on peut obtenir avec la maçonnerie, comme avec la fonte, le remplissage de tous les vides et l'étanchéité parfaite.

Appareils accessoires. — Un ventilateur, débitant 170 m³ d'air frais pris dans un regard et refoulé jusqu'à l'avancement par un tuyau de 0,25 m., maintient dans le chantier une température qui s'élève rarement à 20°. Il est actionné par une dynamo de la Société alsacienne G5 à carcasse fermée de 4 amp. 440 volts. La consommation moyenne par vingt-quatre heures est de 44 000 watts.

Avec un avancement qui atteint par vingt-quatre heures jusqu'à 6 m., le cube à transporter, tant en déblais qu'en matériaux, peut s'élever à 300 m³ : il faut donc, avec la grande distance de transport une locomotive. L'emploi d'un moteur à vapeur aurait

entraîné à des frais considérables de ventilation, et la circulation dans le souterrain rempli de fumée eût été dangereuse. M. Fougerolle a employé, comme au Waterloo and City Ry, une locomotive électrique. Les essieux sont attaqués à l'aide d'engrenages par une courroie commandée par une dynamo Labour de 18 amp. 440 volts de la force de 12 chev. Cette machine, qui circule constamment et fait actuellement le service sur une longueur de plus de 1 km., consomme en moyenne 132 000 watts par vingt-quatre heures.

Elle emprunte son courant à une ligne indépendante des gros fils d'éclairage et composée de deux fils à trolley en cuivre nu posés sur isolateurs. Sur ces fils circule un chariot monté sur quatre galets en bois et muni de deux poulies en cuivre de prise de courant. Ce chariot est réuni à la locomotive par un fil souple, ce qui laisse toute aisance pour passer dans les voies de garage, marcher en avant ou en arrière, suivant les besoins des manœuvres.

Organisation générale. — Tous les appareils montés à l'intérieur du chantier sont mus électriquement et alimentés, sans parler des fils à trolley, par deux gros fils. Le courant leur est fourni par le secteur urbain d'éclairage et de force, au prix de 0,40 fr. le kilowatt. La consommation journalière s'établit comme suit :

Bouclier, 1 836 watts par course, soit pour 5 courses 1/3 .	9 786 watts.
Ventilateur	44 064 —
Locomotive	132 192 —
Transporteur.	106 080 —
Éclairage	mémoire
Total . .	292 122 watts.

soit en chiffres ronds 300 kilowatts représentant une dépense de 120 fr. ; l'avancement moyen étant de 3,20 m. la dépense par mètre courant est de 37,50 fr.

A l'origine du chantier, à la Barrière, le souterrain est desservi par deux galeries provisoires en bois. L'une d'elles aboutit dans le fossé des fortifications. On y a établi une voie de service qui remonte par une rampe établie dans le talus de contrescarpe jus-

qu'au niveau du glacis et aboutit dans une gare de la Compagnie des chemins de fer de l'Ouest. Par cette voie arrivent tous les matériaux, sable, meulière, ciment, et peuvent être évacués une partie des déblais. La seconde galerie passe sous le boulevard Militaire en dedans de la fortification et aboutit dans un élargissement de ce boulevard, en dehors de la circulation. Dans ce terrain, qui a été enclos, se trouvent les bureaux, magasins et ateliers de l'entreprise ; on y a établi, en outre, une estacade sur laquelle on refoule les wagons de déblais. Ces wagons peuvent ainsi être déchargés directement dans des tombereaux qui se rendent aux décharges publiques.

Marche du travail. — Le bouclier a été construit par M. Augé dans une grande chambre boisée formant un cube de 10 m. de côté, sous l'avenue de Clichy, à la barrière même. Cette opération fort délicate s'est faite sans incident. Le montage du bouclier a été commencé le 9 mars 1896 ; il était complètement terminé et mis en marche le 2 avril. On était à ce moment dans les marnes du niveau de Saint-Ouen. La marche fut d'abord lente, mais atteignit rapidement 3,00 m. par vingt-quatre heures, avec deux équipes de 29 hommes au déblai et de 17 ouvriers à la maçonnerie. Dès le 19 avril, le couteau était déformé par la rencontre d'un banc de roche et on perdit trois jours à le réparer. La moyenne du mois fut de plus de 2,25 m.

Au commencement de mai, on perdit encore trois jours au montage du transporteur. Le 21 mai, on faisait pour la première fois 5,40 m. dans une journée ; mais, quelques jours après, à la suite d'un orage violent, le chantier était envahi par l'eau et il fallait s'arrêter encore trois jours. Ces arrêts réduisirent la moyenne à 2,85 m. En juin, on faisait couramment de 4,20 m. à 4,80 m. par jour, et on constatait qu'une simple charge de quelques tonnes de gueuses suffisait à redresser le bouclier, quand il avait une tendance à tourner. Pendant les treize premiers jours, l'avancement moyen fut de 4,00 m. Mais les vérins qui étaient en fonte, commencèrent à se briser et on dut arrêter le chantier pour les remplacer par des vérins en acier.

L'avancement ne fut repris que le 23 juillet après 40 jours d'in-

terruption. Le 31 juillet, on était à 251,40 m. C'est de ce moment seulement que date le travail régulier.

En août, on a rencontré constamment des bancs de roche qui ont retardé l'avancement et faussé l'avant-bec. L'avancement moyen a été par suite réduit à 2,77 m.

En septembre, le chantier a été encore une fois inondé par les eaux d'orage, ce qui a causé un arrêt de quatre jours. A la fin du mois, on commençait à trouver en bas le sable et l'eau. L'avancement moyen s'était relevé à 3,60 m.

Le mois d'octobre n'a eu d'autre arrêt que celui causé par les fêtes et on a fait en moyenne 3,40 m. ; mais en novembre, en plein sable, on fit souvent 5,40 m. et la moyenne monta pour la première fois à 4,00 m.

Au milieu de décembre, le bouclier traversa un fontis et les terres détrempées exercèrent une pression énorme qui déformèrent légèrement l'arrière-bec. Comme on avait des craintes sérieuses que la voûte ne vînt à céder au décintrement, on arrêta l'avancement et, à l'aide d'une galerie boisée, on vint, en partant de l'avancement et en passant par-dessus le bouclier, renforcer la voûte sur 10 m. de longueur. On perdit quinze jours à ce travail : aussi ne fit-on que 2 m. d'avancement moyen. Sans cet incident ont eût eu une aussi belle marche qu'en novembre.

En résumé, en 1896, pendant les cinq mois de marche normale, on a parcouru 481,20 m., en cent cinquante-trois jours ou 3,15 m. par jour.

En janvier 1897, la marche a été très variable. Dans le sable on arrivait facilement à 5,40 m. et on a même atteint le maximum de 6 m. ; mais par moments on était retardé par de gros blocs ou même des bancs de grès très difficiles à arracher. L'avancement a néanmoins été de 3,60 m. En février, les grès se faisant plus rares, on atteignit 4,15 m.

En mars, au contraire, par suite de négligence ou de fausses manœuvres, les cintres reculèrent sous l'effort des vérins : il en résulta des retards, qui venant s'ajouter à l'abondance des grès, réduisirent la moyenne à 2,85 m. En avril, on obtint à nouveau un avancement de 3,32 m.

La moyenne pour les quatre premiers mois de 1897 ressort à

3,20 m., chiffre très voisin de celui de l'année 1896 et que l'on doit considérer comme le véritable avancement moyen, tous arrêts compris.

En mai 1897, on atteignait la seule courbe du tracé. Cette courbe de 100 m. de rayon a été franchie sans difficulté et avec une grande précision. Cet avancement est résumé dans le profil ci-joint (fig. 316).

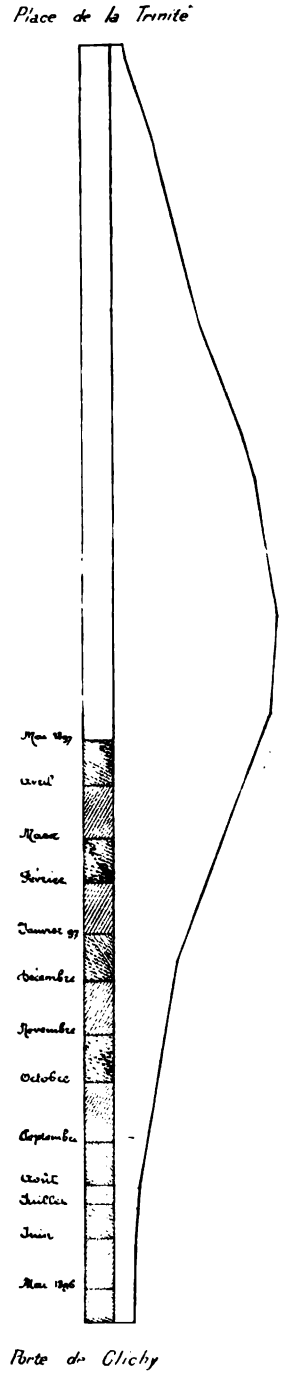


Fig. 316. — Profil d'avancement.

Observations. — On peut dire que le bouclier a traversé avec succès des terrains très durs, tels que la roche, des terrains détrempés et des sables ébouleux avec un égal succès et que l'on a constamment maintenu une vitesse de 3,20 m. par vingt-quatre heures. C'est incontestablement un succès et une démonstration complète des avantages de la méthode.

Est-ce à dire qu'il n'y ait pas de critiques à faire? S'il n'y en a pas sur le principe et l'organisation générale, il faut cependant signaler quelques défectuosités du bouclier.

1° Les vérins sont trop forts et trop peu nombreux, et comme ils n'appuient sur les cintres, que par leurs tiges en des points isolés et éloignés les uns des autres sans répartir la pression, ces derniers se déforment légèrement à chaque course et fatiguent beaucoup. Ils nécessitent un entretien coûteux et, quand ils sont complètement tordus, n'offrent plus toute la sécurité désirable.

2° Le couteau est un peu faible et a été, à diverses reprises, déformé par la rencontre de bancs de rochers ; il conviendrait de le renforcer par des blocs d'acier, comme au souterrain de Blackwall.

3° Les poutres elliptiques sont très encombrantes ; elles prennent une flèche sous la pres-

sion des terres, et on a dû les soutenir par des pièces de bois placées verticalement entre les planchers. Il serait bien préférable de les remplacer par de fortes divisions verticales, comme au bouclier de la Station de la Cité au Waterloo and City Ry.

Sous ces réserves de détail, on ne peut qu'applaudir à l'initiative heureuse de M. Fougerolle, qui, s'il n'a pas réalisé de gros bénéfices avec un rabais aussi élevé, aura eu le grand mérite d'ouvrir une voie nouvelle pleine d'avenir.

CHAPITRE XIV

OUVRAGES DIVERS

Il sera parlé dans ce chapitre d'un certain nombre de travaux où il a été fait emploi, soit du bouclier, soit de l'enveloppe en fonte, et sur lesquels on ne possède que peu de renseignements ou des indications partielles. L'énumération en est certainement encore très incomplète, mais ceux qui seraient omis sont d'une importance secondaire.

Anvers. — Il a été déjà dit que le premier souterrain, exécuté à l'air comprimé, avait été fait à Anvers en 1879 par l'entrepreneur français M. Hersent.

Ce souterrain avait pour but de mettre en communication, avec les machines d'épuisement, les puisards d'un certain nombre de formes de radoub. Il devait être ouvert, à 5,50 m. en contre-bas du niveau de l'eau, dans une couche de sable vert sans consistance. Il eût été très coûteux et encore plus dangereux de procéder par épuisements, ce qui aurait inévitablement causé des affouillements et compromis la solidité des constructions voisines.

Le travail comprenait la construction d'un puits, en maçonnerie de 3,70 m. de diamètre extérieur et 2,50 m. de diamètre intérieur. Il fut foncé, mi-partie à l'air libre et mi-partie à l'air comprimé jusqu'à 12,25 m. de profondeur; après quoi le fond fut maçonné. La partie supérieure du puits fut recouverte d'un plateau métallique et munie d'une écluse pour la sortie des déblais et le passage des pièces de fonte de revêtement du souterrain. Pendant le fonçage, on avait traversé 3,50 m. de remblai, 2,50 m. de terre végétale, 2,75 m. de sable argileux verdâtre coquiller et enfin 3,50 m. de

sable verdâtre très fin sans consistance. L'orifice pour le départ de la galerie avait été préparé dans l'enveloppe en tôle du puits, et c'est sur cet orifice que sont venus se boulonner les anneaux en fonte du blindage de la galerie (fig. 317).

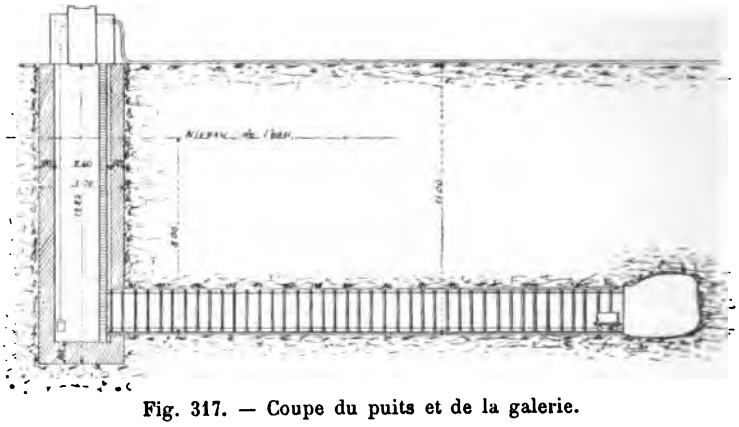


Fig. 317. — Coupe du puits et de la galerie.

La galerie était en ligne droite sur 58 m., en courbe sur 16 m. et se raccordait avec le puisard des pompes par une ligne droite de 16 m. Sa forme était à peu près ovale ; elle était

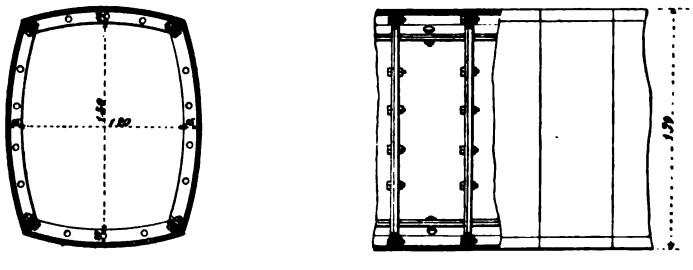


Fig. 318. — Coupes transversale et longitudinale du revêtement en fonte.

composée (fig. 318) d'anneaux en fonte de 0,50 m. de longueur. en quatre pièces, munies de nervures et assemblées avec des boulons. Les joints étaient rendus étanches par l'insertion d'une corde goudronnée, comprimée par le serrage des boulons.

Les plaques occupaient extérieurement 1,75 m. de hauteur et 1,50 m. de largeur et laissaient un espace libre de 1,50 m. sur 1,20 m.

Le déblai à l'avancement a été fait par tranches de 1 m. de longueur à partir du dernier anneau posé ; on donnait à la fouille sur tout son pourtour 0,20 m. en plus de la dimension des anneaux, pour pouvoir les poser aisément. Aussitôt qu'un anneau était mis en place, on le bourrait tout autour avec du sable et on mettait un peu d'argile à la partie supérieure, pour empêcher l'air de s'échapper. Après le démontage de l'écluse, on constata que la galerie était parfaitement étanche.

Ce travail a été payé à forfait 75 000 fr. ; si l'on cumule les 12,25 m. de puits et les 90 m. de galerie, on trouve un prix moyen de 733 fr.

L'exécution de ce souterrain ne paraît pas avoir donné lieu à de grandes difficultés, à en juger par la façon dont la fouille était conduite. Il n'en a pas moins le mérite d'être la première application

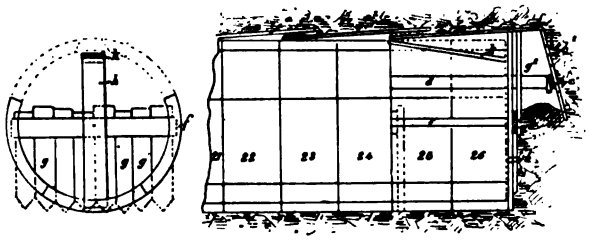


Fig. 319. — Coupes transversale et longitudinale pour l'exécution des déblais.

aux souterrains de l'air comprimé et de l'enveloppe en fonte et d'être peut-être le seul exemple d'une enveloppe en fonte non circulaire. C'est à ce titre qu'il est cité, alors qu'il ne sera pas parlé de bien des souterrains exécutés sous l'eau à l'air comprimé.

Glasgow. — Il a été construit également sous les rues de Glasgow deux petits souterrains dont l'un de 4 pieds (1,22 m.) de diamètre à l'air comprimé, avec revêtement métallique sans bouclier. Ce souterrain a été construit dans le sable mouillé, le gravier et le ballast, et l'avancement était de 1 1/2 yard par jour (1,37 m.).

Le procédé d'avancement ressemble beaucoup à celui en usage avec les boucliers Greathead. On avait l'habitude de faire la fouille en avant du revêtement pour 2 anneaux, soit 3 pieds (0,91 m.)

On employait pour supporter le toit pendant la pose des anneaux onze planches de blindage *aa* (fig. 320) maintenues en avant par les boisages *bb* et reposant en arrière sur les anneaux terminés. Ces planches allaient en montant de 3 pouces (0,076 m.) sur leur longueur, de manière à permettre la pose du blindage pour les anneaux suivants. Pour effectuer la pose des anneaux 25 et 26 par exemple, le mineur enlevait un des étançons *b* sous une planche de couronne *a*, et faisait une fouille en avant sur la longueur d'une planche a^2, et la butait avec l'étançon b^2 (fig. 319). Il continuait de même en s'élargissant de chaque côté jusqu'à ce que toutes les planches a^2 fussent posées et butées sur des étançons b^2. Avant de poser chaque planche on avait bien soin de la recouvrir d'une

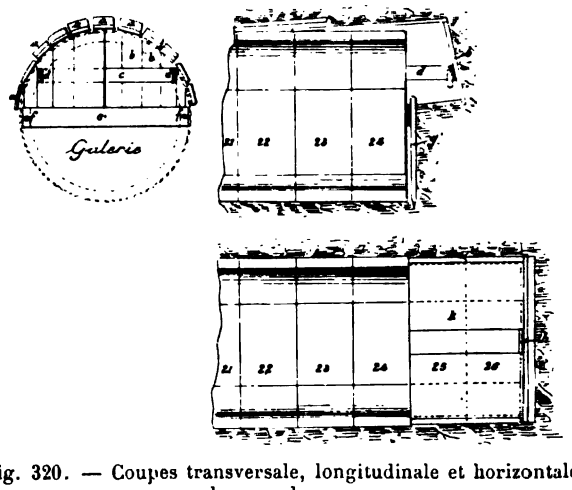


Fig. 320. — Coupes transversale, longitudinale et horizontale pour la pose des anneaux.

couche d'argile bien malaxée. Ce travail occupait deux mineurs qui travaillaient alternativement dans cet espace étroit. Les étançons b^2 étaient alors maintenus par une couche *c* (fig. 320), soutenue par deux étais *d*, butés contre les nervures du dernier anneau posé. On plaçait ensuite une couche *c*, à un peu plus de 3 pieds (0,91 m.) du dernier anneau, de manière à laisser la place pour deux anneaux de 18 pouces (0,46 m.), puis une série de palplanches g^2 que l'on enfonçait progressivement en suivant la fouille. Petit à petit on enlevait le déblai et on mettait la fouille à fond sur la moitié de la longueur. C'est à ce moment que l'on éprouvait de grandes diffi-

cultés ; si la pression venait à baisser, on était obligé de régler la fouille dans l'eau. Il fallait trois heures pour mener la fouille à ce point. Mais dès que le premier segment en fonte du bas était placé,

Fig. 321. — Plan du souterrain de Kingston.

le danger était bien moindre et le travail devenait plus facile. Avant de pouvoir placer le second segment de fond, il fallait enlever les étais provisoires *f*. On les remplaçait par une pièce debout et un étai *h* et *k* (fig. 319). D'ailleurs aussitôt que le second segment était placé, la couche *c* était calée contre le revêtement. On procédait enfin à l'injection de ciment par la méthode habituelle. Toutes les planches de blindage étaient perdues, mais le reste du boisage resservait indéfiniment.

Les anneaux en fonte se composaient de cinq segments et d'une clef ; l'épaisseur du métal était de 3/4 de pouce (0,019 m.) et les nervures avaient une profondeur de 3 pouces 3/4 (0,095 m.)

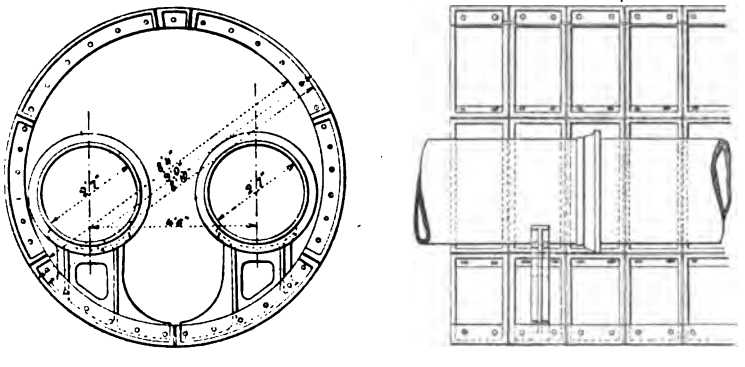


Fig. 322. — Coupes transversale et longitudinale du revêtement métallique.

Ce travail est très intéressant ; car il constitue la meilleure critique de l'emploi d'une galerie et d'un blindage en avant du bouclier qui a été relevée à diverses reprises à propos des travaux du

City and South London, de Glasgow et du Waterloo and City. Il est inutile d'y insister ; les faits parlent d'eux-mêmes.

Blackton. — Le service des eaux de Stockton et Middlesbrough a fait construire, en 1889, un souterrain de 142 yards (129,85 m.)

Fig. 323. — Vue de l'avant du bouclier.

de longueur et 13 pieds 6 pouces (4,11 m.) de diamètre intérieur. On traversa un terrain de schiste et il n'y eut pas besoin de recourir à l'air comprimé.

Le revêtement en fonte se composait d'anneaux de 21 pouces (0,53 m.) de largeur posés à l'abri d'un bouclier analogue à celui du chemin de fer électrique du City and South London. L'entrepreneur, M. Sewell, qui avait travaillé à ce dernier, introduisit ici un

léger perfectionnement. Pour éviter l'usure des cuirs des pompes de compression, due aux corps étrangers de toute nature qui tombaient dans les réservoirs, montés sur le bouclier, il fit fermer ces réservoirs par des couvercles et les munit de tubes de niveau d'eau, comme pour une chaudière, afin que l'on pût se rendre compte s'ils étaient pleins.

Fig. 321. — Vue de l'arrière du bouclier.

Kingston. — Il s'agit d'un petit ouvrage sous la Tamise exécuté pour recevoir deux conduites de 42 pouces (1,07 m.) de la distribution d'eau de Southwark et Vauxhall, en 1891, à Kingston, à l'amont de Londres, près de Richmond.

Ce souterrain a 8 pieds 4 pouces (2,54 m.) de diamètre intérieur et 540 pieds (164,59 m.) de longueur (fig. 321).

Le revêtement en fonte (fig. 322) se compose d'anneaux de 1 pied 6 pouces (0,457 m.) de longueur, formés de 6 segments et d'une clef. Les segments ont une épaisseur de 7/8 pouce (0,022 m.) et sont munis de nervures de 1 1/4 pouce (0,032 m.) d'épaisseur et 4 pouces (0,10 m.) de hauteur, ce qui porte le diamètre extérieur à 9 pieds. Les trous de boulons, au nombre de 6 sur les joints verticaux pour les segments et de 1 pour la clef, soit 37 en tout et les trous de boulons pour les joints horizontaux au nombre de deux, avaient été ovalisés pour faciliter l'assemblage. ils avaient 1 pouce 1/2 (0,038 m.) sur 1 pouce 1/4 (0,032 m.) et recevaient des boulons de 1 pouce (0,025 m.) de diamètre. Tous les joints étaient rabotés. Le revêtement pesait 2 t., 2 cwt, 37 livres par yard (2 352 kg. par mètre courant).

Le souterrain a été percé à sec dans l'argile de Londres, sans air comprimé, au moyen d'un bouclier du type Greathead (fig. 323 et 324).

Le prix de revient de ce souterrain peut se décomposer comme suit :

Fouille, pose des segments, injections. .	12 l. 10 s.	par yard,	ou 348,32 fr.	par mètre
Fourniture de fonte pour les segments et boulons.	9 l. 15 s. 6 d.	—	ou 267,23	—
Droit de brevet pour le bouclier, 200 l. ou .	1 l. 2 s. 3 d.	—	ou 30,38	—
Total . . .	24 l. 3 s. 9 d.	par yard,	ou 645,93 fr.	par mètre

Brooklyn. — Les Américains, on l'a vu, n'ont jamais été trop chauds partisans de l'emploi du bouclier. Ils reprochent à ce procédé d'exiger une grosse mise de fonds et une machinerie considérable. En outre, soit que les boucliers construits en Amérique, comme ceux de Beach, fussent d'une construction imparfaite, soit que l'on n'apportât pas à leur conduite tout le soin désirable, on avait grand'peine à les maintenir en direction, et c'est même le plus gros reproche qu'on leur ait fait.

Ainsi à Brooklyn, on en avait construit un pour la construction d'un égout sous Knickerbocker Avenue, dans un sable fin. On essaya d'abord de forcer le bouclier dans le terrain, dans l'espoir qu'il serait découpé par le couteau et que le sable coulerait par les

portes; mais comme le sable est incompressible on ne put y réussir, et il fallut fouiller en avant de la cloison. C'était là une opération dangereuse, car le couteau était disposé, comme dans tous les boucliers anglais et américains dans un plan vertical. On dut y renoncer et finalement abandonner le bouclier derrière les maçonneries.

Cet échec établit nettement la supériorité du type à visière en terrain sec, qui a si bien réussi aux travaux du collecteur de Clichy, dans un terrain certainement très analogue à celui où le bouclier de Brooklyn a échoué.

Edimbourg. — A Edimbourg, une levée connue sous le nom de Mound, sert à franchir un ravin et à réunir la vieille et la nouvelle ville. Les voies d'accès à la gare du North British Railway passent sous cette levée. En 1893, cette compagnie dut pour les besoins d'exploitation augmenter le nombre de ces voies et résolut de franchir le Mound par deux nouveaux souterrains à voie unique.

Comme d'importants monuments publics s'appuient sur cette levée et qu'elle est entièrement faite de remblais, on lui imposa l'exécution à l'air comprimé dans le but d'éviter des tassements.

Ces deux souterrains ont 16 pieds 4 pouces (4,98 m.) de diamètre intérienr et 250 yards (228,60 m.) de longueur. On y a employé un revêtement en fonte.

Les anneaux ont 1 pied 6 pouces (0,457 m.) de longueur et se composent de 14 segments de 4 pieds 4 pouces 15/16 (1,34 m.) de développement circonférentiel et d'une clef de 9 pouces (0,23 m.). La fonte a 1 pouce 3/4 (0,044 m.) d'épaisseur, et chaque segment est muni de nervures de 7 pouces (0,18 m.) de profondeur et 1 pouce 3/8 (0,036 m.) d'épaisseur, ce qui porte le diamètre extérieur à 17 pieds 6 pouces (5,33 m.). Les nervures sont, en outre, munies de renforcements de 1 pouce 5/8 d'épaisseur (0,041 m.). Tous les joints sont rabotés et l'assemblage fait avec des boulons de 1 pouce 3/8 (0,036 m.) de diamètre.

Ce travail a été terminé avec succès en 1894.

Melbourne. — Le souterrain de Melbourne est tristement célèbre par le grave accident qui se produisit en avril 1895.

Les eaux d'égout de la ville de Melbourne et de ses faubourgs devaient être refoulées sur des champs d'irrigation. Il fallait pour cela construire un souterrain sous la rivière Yarra dont le fond se compose de sable, d'argile et de tourbe. Le diamètre avait été fixé à 11 pieds (3,35 m.), et on avait placé le dessus de la galerie à environ 25 pieds (7,62 m.) au-dessous du niveau des hautes eaux. de manière à réserver un minimum de 11 pieds (3,35 m.) de terre entre la galerie et le fond du lit.

Le souterrain fut attaqué en partant d'un puits de 61 pieds (18,59 m.) de profondeur et s'exécuta sans difficultés sur environ 300 pieds (91,44 m.). A ce moment on rencontra un terrain mou et friable. On employa une enveloppe métallique en fonte du type ordinaire, mais revêtue intérieurement d'un blocage en béton et d'un enduit de ciment qui réduisaient le diamètre intérieur libre à 9 pieds (2,74 m.) La fouille était faite avec un bouclier du type dit type Greathead, analogue au bouclier du City and South London Railway. Chaque course était de 2 pieds 9 pouces (0,83 m.) correspondant sans doute à la largeur de deux anneaux. Ce bouclier était mû par des vérins hydrauliques et avait une ouverture centrale rectangulaire de 6 pieds (1,83 m.) de hauteur et 4 pieds (1,22 m.) de largeur. Quand on eut atteint le mauvais terrain et résolu de recourir à l'air comprimé, on installa deux compresseurs au sommet du puits qui pouvaient fournir de l'air comprimé sous une pression 14 à 15 livres (0,984 kg. à 1,054 kg.) bien supérieure à la pression hydrostatique. Au moment de l'accident, la galerie avait une longueur de 132 pieds (40,23 m.) au delà de l'écluse. Le front de taille présentait en bas du sable argileux, au milieu une couche de sable, et, en haut un sol argileux. Le revêtement en béton était exécuté jusqu'à l'écluse, mais dans la chambre à air, les anneaux de fonte étaient seuls posés.

L'écluse se composait de deux murs de briques de 5 pieds 6 pouces (1,68 m.) d'épaisseur, laissant entre eux un espace libre de 12 pieds (3,66 m.) ; ils limitaient une chambre à air qui était voûtée en briques. On accédait à ce sas par des portes de 4 pieds 6 pouces (1,37 m.) de hauteur placées au niveau du sol; ces portes étaient en fonte et munies dans leur partie haute d'un regard en verre.

L'après-midi du 2 avril 1895, il y avait 6 ouvriers à l'avancement. Une autre équipe venait de faire entrer dans l'écluse un truck chargé de segments en fonte ; la porte d'entrée était fermée et le robinet ouvert pour mettre l'écluse à la pression de 15 livres (1,03 kg.) de la chambre à air, ce qui pouvait demander deux à trois minutes. Tout à coup, un homme apparut dans la galerie devant la porte de l'écluse et essaya de l'ouvrir ; mais elle était maintenue par l'excès de pression de l'air dans la galerie. Immédiatement après apparut l'ingénieur M. Buchanan qui fit avec sa lumière des signaux pour inviter les ouvriers à se hâter d'ouvrir la porte. Mais au même moment la galerie retombait dans l'obscurité et on vit monter l'eau au-dessus de la fenêtre. Les hommes de l'écluse s'empressèrent de retourner au puits pour avertir de ce qui se passait.

On espéra pendant quelque temps qu'il était resté assez d'air dans la galerie pour que les hommes pussent respirer ; mais quand on vit, le lendemain matin samedi, l'air s'échapper dans la rivière, on crut devoir renoncer à cette chance de salut. L'entrepreneur M. Robb et un frère de M. Buchanan descendirent et constatèrent qu'il sortait à travers le mur de l'écluse un filet d'eau de 3 pouces (0,076 m.). Ils pénétrèrent dans l'écluse et essayèrent le robinet qui ouvrait la communication avec la galerie et se trouvait en haut de l'écluse ; ce robinet donna de l'eau et on en conclut qu'il n'y avait plus aucun espoir de sauver les hommes.

On fit alors descendre un plongeur pour explorer le fond du lit de la rivière. Il reconnut qu'il existait un trou de 10 pieds (3,05 m.) de diamètre et 9 pieds (2,74 m.) de profondeur avec environ 2 pieds (0,61 m.) de boue au fond, au-dessus du bouclier ; dans ce trou on sentait très bien l'air s'échapper. Sur les flancs de cette excavation, l'argile était dure et en surplomb. Le plongeur redescendit, après avoir rendu compte de la situation, avec une bâche, qu'il devait placer au-dessus du trou. Mais l'échappement de l'air l'empêcha d'y réussir et on dut insérer dans la bâche un tuyau de 3 pouces (0,076 m.) de diamètre qui descendait jusqu'au bouclier et permettait à l'air de s'échapper. Après que le plongeur eut placé dans ce tuyau un fil à plomb destiné à servir de repère à la surface de l'eau, on lui descendit des bateaux des sacs d'argile

qu'il plaça au-dessus de l'excavation. On y fit entrer cinq cents sacs d'argile, au-dessus desquels on coula deux charges de bateau, d'argile pure.

Quand ce travail fut terminé, on retourna à l'écluse et on reconnut qu'il ne venait plus d'eau par le robinet, mais rien que de l'air : ce qui prouvait que sous la pression de l'air, l'eau avait baissé. Néanmoins, personne ne voulut pénétrer dans la galerie et on se contenta d'y envoyer de l'air jusqu'au lundi soir, soixante-douze heures après l'accident. On essaya alors d'extraire l'eau par le tuyau de vidange ; elle s'échappa avec violence, les hommes en eurent bientôt au-dessus du genou et la poussée de l'eau était si forte qu'on ne put refermer le robinet. Les ouvriers se décidèrent à entrer dans l'écluse et, après l'avoir mise en pression, ils pénétrèrent dans la galerie ; ils commencèrent par tamponner de l'intérieur le tuyau de sortie de l'eau, puis ils cherchèrent et trouvèrent les corps des victimes. Cinq étaient sur le dos l'un à côté de l'autre près de la porte, et l'autre était à quelque distance. Il n'y avait pas trace de blessure et tous semblaient dormir. Quoique l'accident fût arrivé le vendredi à 7 heures du soir, la montre de M. Buchanan était arrêtée à 2 heures. On constata que l'arête du couteau du bouclier était à 2 pieds 9 pouces (0,83 m.) du front de taille, c'est-à-dire que la fouille était terminée et que l'on était prêt à avancer le bouclier. La plupart des boisages provisoires de la fouille étaient en place et on pouvait constater que la communication avec la rivière s'était faite dans le banc de sable à hauteur de l'axe. Comme on avait rencontré dans ces sables des blocs de pouddingue, quelques jours avant, on supposa que c'est en voulant enlever un de ces blocs que l'on avait déterminé l'accident.

Pour être complet, il convient d'ajouter que le 21 mars un navire à vapeur, passant à marée basse au-dessus du bout de la galerie, avait touché 5 fois le fond de la rivière et avait dû avec sa quille tracer des sillons de 2 à 3 pieds (0,61 m. à 0,91 m.) de profondeur. On crut même retrouver la trace d'un de ces sillons, à côté de l'excavation.

Quelles sont les leçons à tirer de cette triste expérience ? Sans entrer dans les polémiques qui suivirent l'accident, on peut dégager quelques points essentiels.

On s'est tout d'abord étonné que l'air ait pu s'échapper de la partie de la galerie située au-dessus de la porte du bouclier qui, on s'en souvient, n'avait que 6 pieds (1,83 m.) de hauteur ; ce qui, en la supposant au milieu, devait constituer dans la galerie une cloche de 2 pieds 1/2 (0,76 m.) dont l'air ne pouvait s'échapper. Car, ajoutait-on, puisque les compresseurs avaient suffi à alimenter la chambre à air jusqu'à ce moment, puisqu'il ne s'était produit aucun désordre et aucune fuite nouvelle dans la galerie mais uniquement au centre du front de taille, il devait être facile de maintenir la pression dans cette cloche. On a avancé que les compresseurs avaient été arrêtés quand on avait constaté que le robinet, situé au sommet du sas à air, donnait de l'eau et qu'il n'en sortait plus d'air. Enfin, comme par suite du peu de hauteur de ce sas, ce robinet ne pouvait se trouver qu'en contre-bas de la hauteur de 2 pieds 1/2 (0,76 m.) où l'air devait être cantonné, on en a conclu que cet arrêt avait été une grosse faute. On s'est même appuyé sur ce que la montre de l'ingénieur Buchanan était arrêtée à 2 heures, c'est-à-dire sept heures après l'accident, pour en conclure que les victimes avaient pu survivre assez longtemps. Peut-être cette dernière conclusion est-elle peu sûre, car la montre a pu marcher jusqu'au complet déroulement du ressort, si elle était bien étanche.

Tous ces regrets sont superflus ; en réalité, la faute est d'avoir employé un type de bouclier dangereux, muni d'une porte que l'on ne pouvait fermer, sans divisions à l'avancement pour briser l'effort de l'eau et permettre de clore plus aisément des ouvertures moins larges. Cette défectuosité a été signalée maintes fois au cours de cet ouvrage, et les faits sont malheureusement trop frappants pour qu'il soit utile d'y insister.

Ce n'est pas tout : avec un terrain aussi perfide on aurait dû employer, soit le système du sas de sécurité, ou tout au moins, un écran, comme au souterrain de Blackwall.

C'est certainement l'emploi irraisonné d'un type de bouclier, créé pour une tout autre nature de terrain et l'absence de toute mesure de précaution auxquels il faut attribuer l'accident ; et c'est en cela qu'il doit servir de leçon.

Emmersberg. — En exécutant un souterrain en Suisse, aux

abords de la ville de Schaffouse en 1894, dans des terrains de sable et d'eau, on se vit obligé, à la suite de graves éboulements, d'employer l'air comprimé et de construire une petite galerie avec revêtement métallique et à l'aide d'un bouclier.

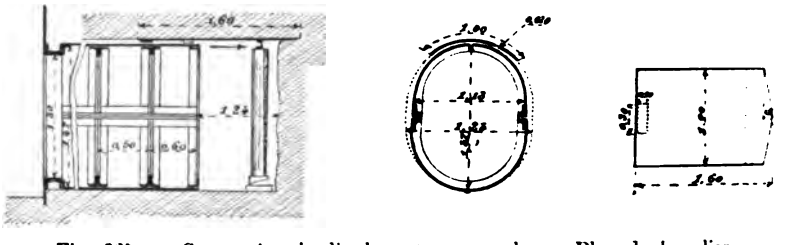


Fig. 325. — Coupes longitudinale et transversale. — Plan du bouclier.

Les installations furent faites sur les conseils de M. le professeur Conrad Zschokke. La figure 325 représente le revêtement métallique de cette petite galerie et le bouclier rudimentaire qui y fut employé. Il n'y a de ce petit travail à retenir que deux choses. En premier lieu, la partie vraiment utile de l'avant-bec du bouclier en terrain ébouleux, c'est le toit, ce qui justifie bien la forme en

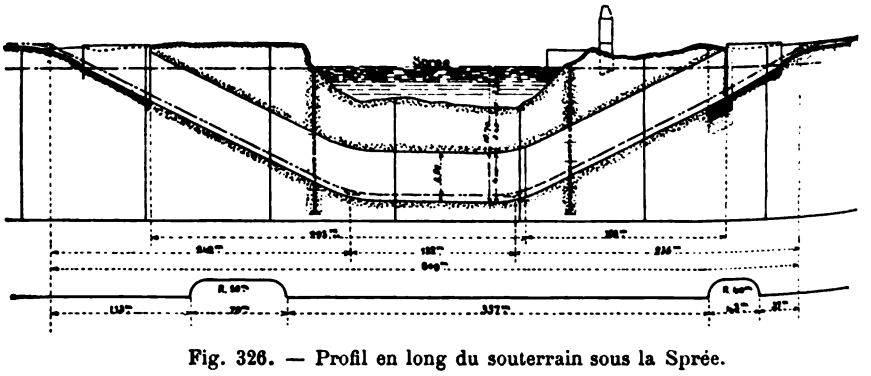


Fig. 326. — Profil en long du souterrain sous la Sprée.

visière. En second lieu, on constata que, dans un terrain de sable, il était très difficile de maintenir la pression et absolument indispensable de garnir d'argile tous les joints et toutes les parties découvertes.

Berlin. — Il a été exécuté, à Berlin, par une société de chemins de fer souterrains une galerie d'essai sous la Sprée. Cette galerie

qui devait faire partie d'une ligne reliant Treptow à Stralau a été poussée en 1895-1896 sur 160 m.

Ce souterrain devait avoir 453 m. et franchir la Sprée dont la largeur à cet endroit est d'environ 200 m. Son radier était prévu à 10,70 m. au-dessous du niveau de l'eau, de manière qu'au point le plus profond de la rivière, où il existe une hauteur d'eau de 3,30 m., le souterrain supposé de 4,00 m. de diamètre fût encore protégé par une couche de terre de 3,40 m. La portion construite se trouve dans la rampe d'accès de 1/20 et s'étend sur 35 m. sous le lit de la rivière.

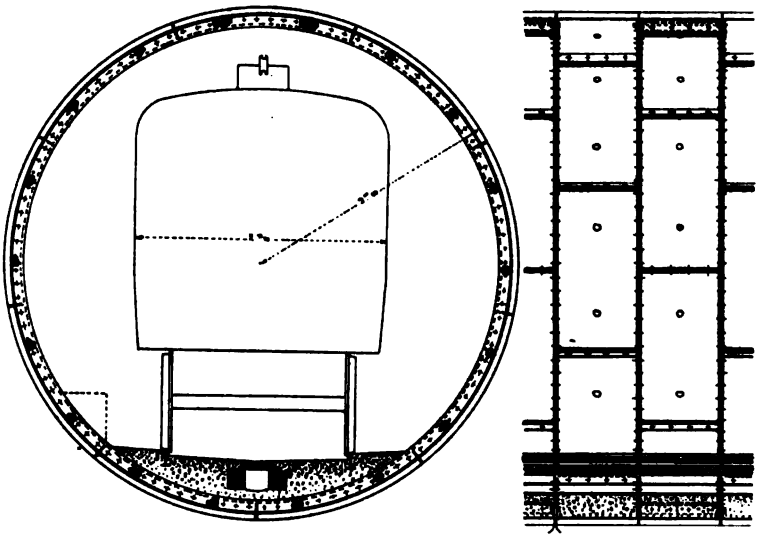


Fig. 327. — Coupes transversale et longitudinale du revêtement.

Les figures 326 et 327 donnent les dimensions et dispositions de ce souterrain. Le revêtement métallique circulaire se compose d'anneaux de 0,65 m. de largeur, entre lesquels sont boulonnés, comme dans le pilote de M. Andersen, sous la rivière de l'Hudson, des plaques de renforcement de 15 mm. d'épaisseur. Chaque anneau comprend 9 segments de 10 mm. d'épaisseur avec nervures de 0,10 m. de hauteur et de même épaisseur; la clef est de dimension très réduite et d'une forme un peu spéciale. Le diamètre intérieur libre est de 3,80 m. Les plaques de renforcement, placées dans les joints verticaux entre les anneaux, font saillie de 50 mm.

à l'extérieur, mais à l'intérieur sont en retrait de 15 mm. sur les nervures des segments. La saillie a pour but de préparer des chambres isolées à l'arrière du bouclier pour l'injection du mortier; le petit retrait devait servir comme d'habitude à cimenter les joints à l'intérieur. Il existait naturellement dans les segments des trous préparés pour l'injection.

Tout ce revêtement était en fer au lieu de fonte. On estimait que l'on obtiendrait ainsi, avec la faible épaisseur donnée au métal, une grande résistance avec un poids bien moindre, à condition, bien entendu, de le protéger par un enduit de ciment contre l'ac-

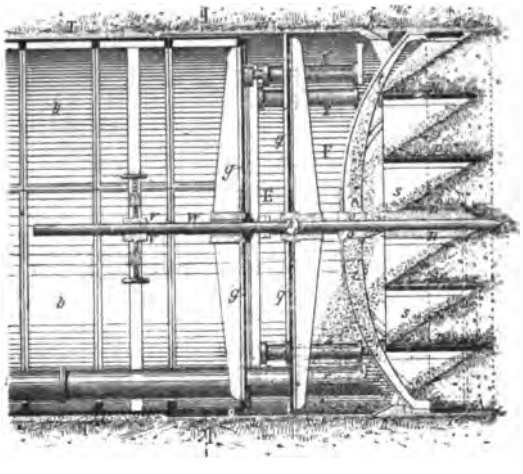


Fig. 328.

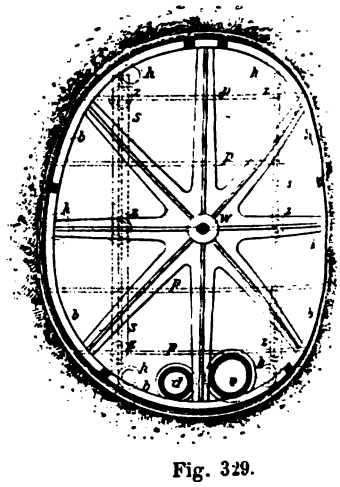


Fig. 329.

Premier type. — Coupes longitudinale et transversale.

tion de la rouille. Le poids par mètre courant était seulement de 1 800 kg. environ, chiffre évidemment très faible pour le diamètre.

On appliqua, pour raidir ce revêtement, le principe très heureux, et dont il a été déjà parlé, de croiser les joints horizontaux.

On construisit tout d'abord une fosse maçonnée de 19 m. de longueur sur la rive au fond de laquelle on monta quelques anneaux, bien butés contre les parois, ainsi que le bouclier. Quand ce montage fut terminé, on installa à l'intérieur une cloison et des sas à air pour mettre le souterrain en communication avec la surface, et, au-dessus du bouclier et des anneaux, on remplit la fosse de sable. On put alors envoyer de l'air comprimé dans la chambre

de travail et attaquer le souterrain en perçant la paroi de la fosse.

Le bouclier était d'un type particulier inventé par M. Mackensen,

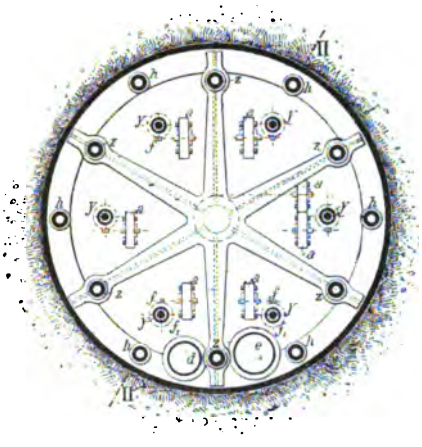


Fig. 330. — Coupe transversale.

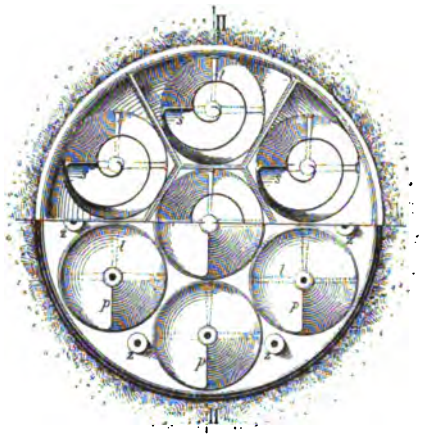


Fig. 331. — Vue en bout.

ingénieur allemand. Les premiers brevets de l'inventeur comportaient 3 types de bouclier.

Le premier représenté par les figures 328 et 329 paraît direc-

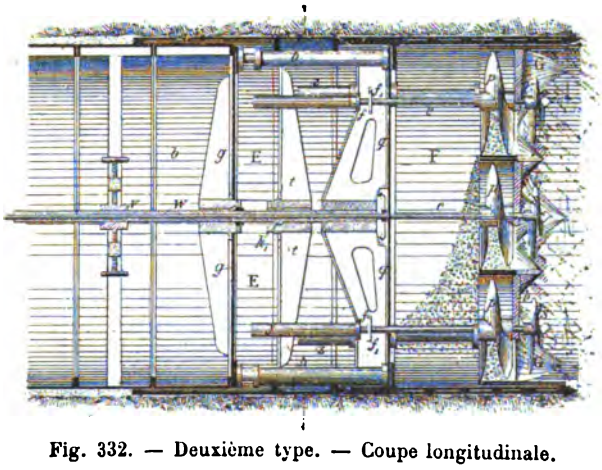


Fig. 332. — Deuxième type. — Coupe longitudinale.

tement inspiré par le taret de Brunel avec l'addition de l'emploi de l'air comprimé.

Le bouclier est monté sur un axe W. Il se compose d'une enveloppe générale, *m r*, qui peut progresser sous l'action des

vérins hydrauliques *h*. Ces derniers prennent point d'appui sur le revêtement par l'intermédiaire d'un plateau *g*, étanche, de sorte que le souterrain lui-même n'a pas besoin d'être maintenu en pression. Les trousses coupantes, *p*, sont réunies à la partie avant *r*, du bouclier par un plateau *k*, de manière à corriger le mouvement de rotation qui se produit si souvent dans les boucliers. En outre, des presses spéciales, *z*, servent à avancer les trousses coupantes à l'intérieur du bouclier, de manière à effectuer le déblai qui est d'ailleurs évacué automatiquement sous l'action de la pression par le tuyau, *e*. Un dernier plateau, *q*, fixé sur l'arbre, *W*, sert à maintenir la pression au front de taille, quand on enlève le

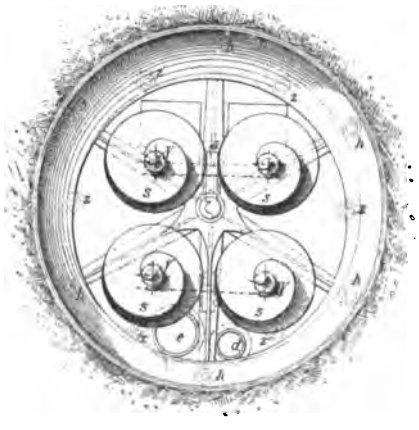


Fig. 333. — Vue en bout.

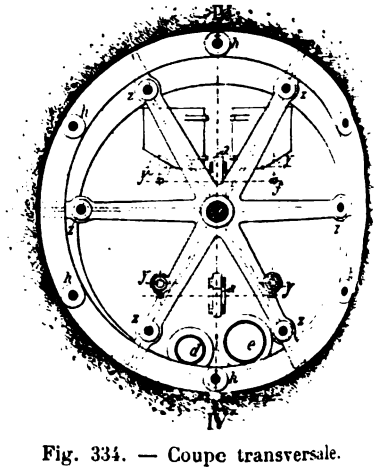


Fig. 334. — Coupe transversale.

plateau, *g*, pour placer un anneau de revêtement avant de reprendre l'avancement.

On espérait ainsi, en réglant la position de l'arbre W, obtenir une direction parfaite, et on comptait beaucoup sur l'exécution mécanique de la fouille.

Dans son second appareil (fig. 330, 331, 332), M. Mackensen remplaçait les trousses coupantes rectilignes, par des trousses cylindriques en forme de socs de charrues, G, à l'intérieur desquelles se meuvent des vis *p* pour débiter et évacuer le déblai. Il fallait par suite ajouter une troisième série de presses hydrauliques, *y*, pour mouvoir ces vis et des moteurs électriques, *a*, pour les faire tourner.

Le dernier modèle (fig. 333, 334, 335) ne diffère du précédent que parce que l'on a donné au bouclier la forme en visière du talus naturel des terres et diminué le nombre des vis, de manière à permettre le dégagement des blocs que l'on pourrait rencontrer.

Le bouclier employé à Berlin était de ce type avec cette modification que le plateau *g* fut supprimé; l'emploi d'un sas à air dans la galerie le rendait tout à fait inutile. Il ne paraît pas non plus que l'on ait conservé l'arbre W dont le rôle est bien théorique.

Quels furent les avantages et les inconvénients de ce système nouveau, qui ne diffère en résumé des boucliers parisiens que par l'emploi d'un revêtement métallique en fer et par un procédé de fouille mécanique?

1° Le revêtement paraît s'être bien comporté au point de vue de l'étanchéité et de la résistance aux pressions. Mais on peut se demander, en raison de sa faible épaisseur, quelle sera sa durée et s'il n'eût pas été prudent de donner au revêtement intérieur en maçonnerie une épaisseur suffisante pour résister par lui-

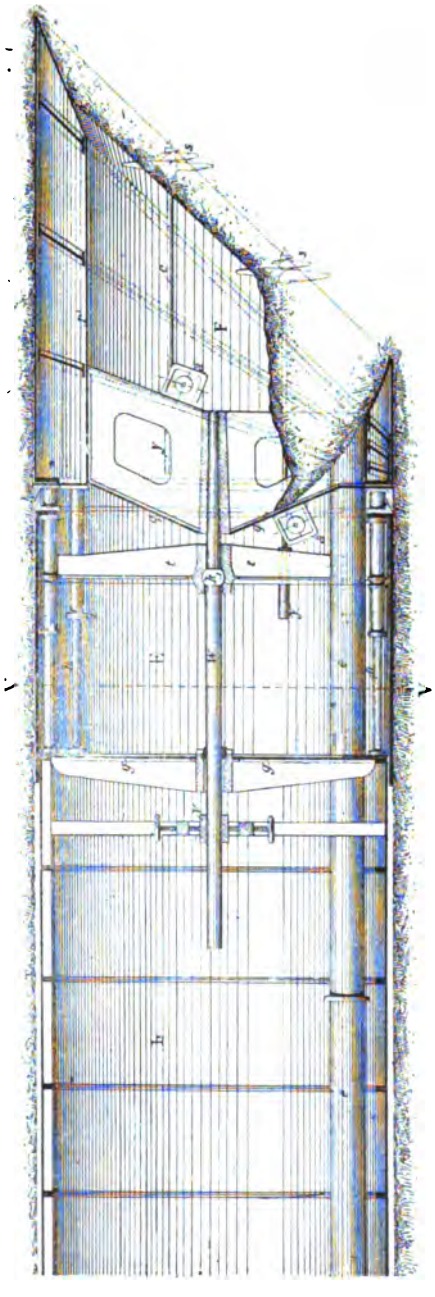


Fig. 335. — Troisième type. — Coupe longitudinale.

même. En ce cas, il constituerait une grosse dépense peut-être inutile.

2° Le procédé mécanique de fouille derrière les cloisons a donné de médiocres résultats. La terre s'éboulait, sous l'action des outils, indéfiniment dans les parties tendres, et il se produisait des vides qui entraînaient des tassements à la surface. Un mur d'essai, chargé de sable, construit au-dessus de la galerie, s'est enfoncé et lézardé. Ce résultat, d'ailleurs facile à prévoir, a dû être aggravé par la saillie à l'extérieur des plaques de renforcement des joints verticaux. Elle avait pour effet d'augmenter de 50 mm. le vide produit par le jeu du revêtement dans le bouclier et l'enveloppe de ce dernier, et, bien que l'on fît des injections de mortier, ce vide, qui pouvait atteindre 0,08 m., constituait un véritable danger.

3° Les presses eurent à développer un effort total de 900 t., notamment quand on n'en employait qu'un certain nombre pour rectifier la direction. On n'a d'ailleurs pas eu de courbes à franchir.

4° L'avancement fut au début de 0,70 m. à 1,00 m. par jour et s'éleva à 1,70 m. et même à 2,00 m. Il est assez faible pour la section et dans un terrain aussi facile, composé uniquement de sable avec quelques racines d'arbre.

En résumé, le procédé Mackensen paraît inférieur à tous points de vue à celui employé à Paris aux travaux du collecteur de Clichy.

CHAPITRE XV

LE BOUCLIER

Exposé. — Un premier enseignement ressort d'une manière frappante de l'étude qui vient d'être faite des divers travaux exécutés en France et à l'étranger par la méthode du bouclier. Le bouclier n'est pas un outil universel et ses dispositions doivent varier suivant la nature des terrains, dans lesquels il doit travailler.

Le bouclier du souterrain de la Tour, du City and South London, etc., celui que l'on a appelé bouclier Greathead, avec ses formes ramassées, avec sa large ouverture ménagée dans la cloison, le couteau dans un plan vertical, convient admirablement aux terrains fermes comme l'argile de Londres, qu'il y a simplement lieu de maintenir et de soustraire à l'action de l'air.

Dans les terrains mous, qui coulent et ne peuvent se tenir sous aucun talus, le couteau peut encore être conservé dans un plan vertical, mais en plaçant, presque immédiatement derrière lui, une cloison munie d'ouvertures petites et nombreuses, par où s'écoule naturellement la masse fluide du terrain, et en avant de laquelle il n'ait jamais pénétré, comme à la rivière Saint-Clair, à l'Hudson, à Liverpool, au Blackwall.

Si, au contraire, il s'agit de terrains ébouleux, soit naturellement secs, soit asséchés à l'air comprimé, qui prennent un talus bien déterminé, il faut éloigner la cloison du couteau, ou même la supprimer, de manière à avoir la place de travailler au front de taille et souvent même donner au couteau la forme en visière correspondant au talus naturel des terres, comme il a été fait aux travaux du collecteur de Clichy.

Ces trois grandes catégories, si nettes qu'elles apparaissent, comportent dans la pratique beaucoup de nuances et de formes intermédiaires et le talent du constructeur consiste précisément à bien

déterminer la forme qu'il convient d'adopter dans chaque cas. L'examen qui va être fait des divers organes du bouclier, portera tout particulièrement sur les différences caractéristiques, correspondant à chacune des trois grandes divisions indiquées.

Enveloppe. — Dans tous les cas il faut que l'enveloppe métallique soit absolument lisse et par suite assemblée avec des rivets à tête fraisée et qu'elle affecte une forme cylindrique et non celle d'un cône. Cette conicité diminuerait, il est vrai, le frottement, mais, en ouvrant la fouille trop large, elle permettrait des tassements à l'arrière. L'enveloppe enfin doit être aussi mince que possible pour réduire le vide laissé autour du revêtement lors de l'avancement, tout en ayant une rigidité suffisante pour ne pas se déformer sous la pression des terres, notamment dans la queue où la place est laissée entièrement libre pour la construction du revêtement sans qu'il soit possible d'introduire aucun support de renforcement.

On s'accorde pour faire cette enveloppe en tôle d'acier et généralement on la forme d'au moins deux épaisseurs, de manière à pouvoir recouper les joints et éviter l'emploi de couvre-joints dont la saillie serait aussi gênante à l'extérieur qu'à l'intérieur. Il n'y a que de rares exceptions à cette règle.

Les épaisseurs des enveloppes des divers boucliers décrits ci-dessus, sont réunies dans le tableau ci-après :

Jusqu'à 4,00 m. de diamètre, l'épaisseur totale moyenne est de 0,02 m. Au delà, il paraît y avoir quelques hésitations; cependant en laissant de côté le bouclier de Glasgow, qui paraît faible, en tenant compte qu'à la rivière Saint-Clair, l'enveloppe était renforcée par des cornières ou des couvre-joints, en se souvenant enfin qu'au collecteur de Clichy l'enveloppe s'est déformée à diverses reprises, on peut dire approximativement qu'à l'épaisseur minima de 0,02 m. il faut ajouter 0,01 m. par mètre de diamètre en plus de 4 m. Cette épaisseur dépend cependant de l'entretoisement intérieur destiné à raidir l'enveloppe et peut varier suivant la force de ce dernier.

Couteau. — Greathead a, dès l'exécution du souterrain de la Tour de Londres, senti la nécessité de renforcer la partie de l'enve-

loppe formant couteau par une pièce massive, taillée en biseau et jouant le rôle des douves de Brunel. Il a placé, à l'intérieur de l'enveloppe, un lourd anneau en fonte. Un peu plus tard, il a formé l'arête de pièces en acier vissées sur l'anneau en fonte et faisant saillie au delà de l'enveloppe, qui n'avait par suite plus à découper le terrain. Dans sa pensée primitive, ces pièces devaient même pouvoir être ajustées, de manière à faire varier la dimension de la fouille, notamment au passage dans les courbes ; mais cette dernière disposition, théorique et dangereuse, n'a pas été conservée.

ÉPAISSEUR DE L'ENVELOPPE

DÉSIGNATION du bouclier.	DIAMÈTRE extérieur.	ÉPAISSEUR de l'enveloppe.	OBSERVATIONS
	Mètres.	Mètres.	
Concorde.	2,06	0,02	
Clichy	2,56	0,02	
Mersey.	3,04	0,0190	2 tôles de 3/8 pouce.
Rivière de l'Est.	3,35	0,0222	1 — d'un 1/2 pouce et 1 de 3/8 pouce.
City and South London.	3,35	0,0254	2 — d'un 1/2 pouce.
Glasgow District	3,68	0,0127	2 — de 1/4 pouce.
Waterloo and City . .	3,96	0,0127	2 — de 1/4 pouce.
Glasgow harbour. . . .	5,26	0,0190	2 — de 3/8 pouce.
Hudson river.	6,07	0,0317	2 — de 5/8 pouce.
Rivière Saint-Clair . .	6,56	0,0254	1 — mais avec des couvre-joints.
Clichy.	7,28	0,028	2 de 14 millimètres.
Blackwall	8,23	0,0634	4 de 5/8 pouce.

A ce type appartiennent les boucliers du souterrain de la Tour, du City and South London, de Kingston, d'Edimbourg, de Waterloo and City, des siphons de Clichy et de la Concorde. Le lourd anneau en fonte qui forme la trousse coupante des boucliers américains de Beach peut également s'y rattacher. Il est important de remarquer que ce sont tous des boucliers construits pour travailler dans les terrains durs appartenant à la première catégorie.

Dans le cas de terrains ébouleux, Greathead avait lui-même prévu, dès 1876, dans le bouclier qu'il avait étudié pour le souterrain de Woolwich dont il a été donné un croquis, le renforcement de la tôle d'enveloppe par des goussets en tôle et cornières sur lesquels peuvent s'appliquer une seconde enveloppe cylindrique

rejoignant la première en forme de cône. Cette tôle forme ainsi une surface de glissement contre laquelle s'écoulent les terres découpées par le couteau. Elle est indispensable toutes les fois que le bouclier doit traverser des terrains mous, qui ne permettent pas de pénétrer dans la partie avant du bouclier et qu'on laisse écouler par des ouvertures plus ou moins nombreuses dans la cloison. Sans cette tôle, les terres se serreraient entre les goussets et empêcheraient l'avancement. Ce sont les terrains de deuxième catégorie, auxquels se rattachent les souterrains de la rivière Saint-Clair, de l'Hudson, de la rivière de l'Est et du Blackwall.

Quant aux terrains de la troisième catégorie, insuffisamment durs pour se tenir sous un talus vertical, mais dans lesquels il est néanmoins nécessaire de faire une fouille pour préparer le passage du bouclier, ils permettent de supprimer la tôle de garniture et de se contenter des goussets. Les vrais boucliers de ce type sont les deux boucliers du collecteur de Clichy.

La même disposition a bien été appliquée au souterrain sous la Mersey, mais il ne faut pas oublier que le bouclier n'avait pas été conçu pour cette nature de terrain, que le couteau s'est déchiré et qu'il a été conservé, après avoir été toutefois renforcé, uniquement parce qu'il y avait grand intérêt à l'utiliser tel qu'il était.

Dans les boucliers du souterrain du port à Glasgow, l'épaisseur de l'enveloppe a été simplement augmentée sans emploi de goussets ; mais cette disposition n'a pu être admise qu'en plaçant la cloison à 1 pied (0,30 m.) de l'arête, ce qui était une erreur comme cela ressortira plus loin.

En tout cas ce couteau doit être très fort ; car il peut être déformé, ce qui entrave la marche du bouclier et entraîne de graves conséquences. Les exemples en sont nombreux et les plus remarquables sont ceux des souterrains de la Mersey et de Blackwall.

Avant-bec. — L'avant-bec est la partie comprise entre l'arête tranchante du couteau et la cloison verticale qui divise le bouclier en deux.

Au début, cet avant-bec était excessivement court, de sorte qu'il était impossible d'y travailler. C'est ainsi qu'il est réduit à

des longueurs d'environ 1 pied (0,30 m.) aux boucliers du City and South London et à tous ses similaires. Cette disposition a de graves inconvénients et oblige à exécuter en avant du couteau d'importants boisages dont une grande partie sont perdus. En terrain dur, il y a une grosse perte de temps et d'argent. A la vue de tous ces boisages, la question se pose même de savoir s'il ne vaudrait pas mieux dans ce cas se dispenser du bouclier, comme au petit travail de Glasgow décrit au chapitre XIV.

Il est cependant facile de remédier à ce défaut et M. l'ingénieur Hay a appliqué, au Waterloo and City, une visière qui n'est, en réalité, puisqu'elle fait presque la circonférence entière et que l'arête tranchante reste dans un plan vertical, qu'un allongement de la chambre de travail qui se trouve portée ainsi à 1,14 m. A la station de la Cité, sur la même ligne, le même ingénieur a été plus loin; il a supprimé la cloison et, pour maintenir les terres, pendant l'exécution de la fouille en avant du bouclier, il a muni les planchers de travail de vérins qui les appuient contre le front de taille et le butent. Cette disposition très ingénieuse a permis de supprimer les galeries boisées ; mais d'autre part, dans ce travail, le ciel a pu sans inconvénient rester sans aucun appui, sur la longueur de l'avancement; il faut donc reconnaître que le terrain était exceptionnellement facile et il est peut-être prématuré de tirer de cette expérience une conclusion quelconque. La seule chose certaine, c'est que la galerie boisée primitivement en usage est inutile, et que, si l'avancement est assez rapide dans cette nature de terrain, il est possible de se dispenser des boisages, ou tout au moins de se contenter du parapluie de M. Berlier ou des palplanches horizontales du collecteur de Clichy, qui soustraient momentanément le toit à l'action de l'air et le soutiennent très suffisamment jusqu'au moment où le bouclier vient offrir une protection définitive.

Lorsqu'il s'agit d'un terrain mou, et si l'on conserve l'arête tranchante dans un plan vertical, il n'y aurait, à la rigueur, pas d'objection sérieuse à conserver un avant-bec très court; mais il faut toujours prévoir qu'il peut devenir nécessaire de pénétrer en avant de la cloison, soit pour enlever des troncs d'arbres, comme sous la Mersey, soit parce que le terrain mou ne règne que sur une partie de la hauteur, et il est prudent de conserver à la chambre

de travail une longueur suffisante pour que les ouvriers puissent s'y tenir et travailler à l'abri du bouclier. C'est ainsi qu'il lui a été donné à la rivière Saint-Clair, 3,43 m., à l'Hudson 2 pieds 6 pouces (1,73 m.), à la Mersey 3 pieds (0,91 m.), à la Rivière de l'Est 3 pieds 8 pouces (1,12 m.), soit en moyenne 1,50 m.

Avec un terrain ébouleux sec, qu'il est nécessaire de fouiller, mais pour lequel il est cependant prudent de laisser aux terres un talus, la chambre de travail doit être encore plus longue. Cette remarque s'applique surtout avec le travail à l'air comprimé. Il est inutile de revenir sur les dangers que présentent les boisages injectés, si ingénieusement imaginés par Greathead au City and South London, sur l'accident de Melbourne et sur les dispositions vicieuses employées à Glasgow. Greathead, qui a collaboré aux boucliers de la Mersey et de l'Hudson, qui avait prévu pour le North and South Woolwich, autant que permet d'en juger le seul croquis qui en reste, une large chambre de travail, aurait été le premier à condamner une chambre trop courte. Son élève, M. Hay, a pris son brevet pour l'allongement de la chambre, pour la partie du Waterloo and City, où l'on devait traverser une couche de gravier à l'air comprimé. Il ne saurait donc y avoir de doutes. Enfin le bouclier de Blackwall présente une très grande chambre de travail, que viennent compléter les blindages du front de taille et les écrans de sécurité.

Lorsqu'il n'est pas nécessaire de recourir à l'air comprimé, la cloison disparaît et la chambre prend toute la longueur correspondant au talus des terres, soit en brisant le talus par des trousses coupantes horizontales, comme dans le bouclier Beach, soit en adoptant la forme en visière, comme dans le bouclier Mackensen et dans les boucliers du collecteur de Clichy.

L'allongement de la chambre de travail a eu comme conséquence indirecte la suppression de l'anneau en fonte destiné à renforcer l'enveloppe et à porter le couteau, et son remplacement par des goussets et une seconde enveloppe de moindre diamètre, solidement reliée à la première, comme il a été expliqué à propos du couteau.

Dès que le diamètre est un peu grand, la poutre circulaire ainsi formée ne présenterait pas encore une résistance suffisante à la poussée des terres et aux efforts qui se produisent dans le couteau

pendant l'avancement. Aussi devient-il indispensable de renforcer l'enveloppe par des divisions verticales et horizontales qui constituent un puissant entretoisement. Ces divisions jouent d'ailleurs dans le travail un rôle important, soit comme planchers pour les ouvriers, soit pour fractionner la chambre de travail en cellules. Elles vont être plus particulièrement examinées à ce double point de vue.

Divisions horizontales. — Il n'y avait pas une hauteur suffisante pour permettre de diviser le front d'attaque par un plancher, au souterrain de la Tour qui n'avait que 7 pieds (2,13 m.), aux siphons de la Concorde et de Clichy dont le plus grand avait un diamètre de 2,50 m., à la Mersey avec une hauteur de 3,04 m., au City and South London ou au Glasgow District Subway avec des diamètres de 3,35 m. et 3,68 m., ni même au Waterloo and City avec un diamètre de 3,96 m. ; la hauteur de chaque étage eût été trop faible pour que l'on pût y travailler à l'aise. Le même motif s'applique au souterrain de Clichy extra muros, mais déjà avec moins de raison. Mais on ne saurait l'expliquer à Glasgow, avec le diamètre de 5,18 m., où, en pratique, il a fallu d'ailleurs diviser le travail en deux, en exécutant en avant du bouclier, sans abri, une galerie supérieure boisée. C'est ce qu'avaient bien compris les constructeurs du bouclier de la Rivière de l'Est. Avec la faible hauteur de 3,35 m., ils ont cependant ménagé deux étages au moyen d'un plancher prolongé par une plate-forme de travail.

Le tableau ci-après donne l'espacement des plates-formes dans les grands boucliers :

DIVISIONS HORIZONTALES

DÉSIGNATION DES OUVRAGES	DIAMÈTRE extérieur.	DIAMÈTRE intérieur.	NOMBRE des planchers.	HAUTEUR des étages.
	Mètres.	Mètres.		Mètres.
Hudson	6,07	»	2	2,00
Clichy (collecteur)	5,92	»	2	2,00
Rivière Saint-Clair	6,56	»	2	2,13
Waterloo (station)	7,50	»	2	2,17
Blackwall	8,23	7,32	2	1,83

Au collecteur de Clichy, qui représente la troisième catégorie, et dans lequel on laisse aux terres leur talus naturel, les divisions sont de simples plates-formes de travail. A la station du Waterloo (première catégorie de terrains durs), elles sont munies de vérins pour leur faire en même temps buter le front de taille contre lequel elles appuient fortement. A la rivière Saint-Clair (deuxième catégorie, terrains mous), elles conservent encore le rôle de plates-formes de travail, mais en même temps elles forment arête coupante et taillent le terrain. A l'Hudson, où il n'y a jamais eu à pénétrer en avant de la cloison (deuxième catégorie), elles servent seulement à découper la vase qui s'écoule par les portes.

Au Blackwall, à ce double rôle de plate-forme de travail et de trousses coupantes, les constructeurs avaient eu l'intention d'en joindre un troisième. La plate-forme du milieu était étanche, de manière que les deux étages du bas puissent servir de chambre de travail distincte avec une pression d'air plus forte que dans les deux étages du haut ; il y aura lieu de revenir sur cette disposition très intéressante.

Dans les terrains ébouleux, qui prennent un talus très allongé, la visière de l'avant-bec arriverait à atteindre une longueur excessive. Il serait difficile de consolider et d'entretoiser cette saillie, à moins de faire entrer dans la construction du bouclier une masse énorme de fer, ce qui exagérerait la dépense. En outre, cet excès de longueur causerait de grandes difficultés pour le passage dans les courbes. Avec un diamètre de 6 m. et des terres se tenant sous un talus à 45°, les dimensions seraient déjà inacceptables. Deux solutions peuvent être adoptées, celle de Beach et celle du bouclier du collecteur de Clichy intra muros. Dans ce dernier, la visière n'a pas été tracée avec l'inclinaison naturelle des terres de 45° ; le talus doit être tenu beaucoup plus raide ; s'il devient absolument nécessaire de l'adoucir, des palplanches mobiles permettent d'allonger la visière. Cette solution convenait bien aux sables humides et aux marnes qui ont été rencontrées dans ce travail. Mais si le souterrain avait dû traverser des sables fins et secs, comme dans la partie extra muros, et surtout s'il avait été à fleur de sol, cette disposition aurait pu provoquer des éboulements et des tassements à la surface. Dans ce cas, qui peut se présenter

fréquemment dans les travaux urbains, il serait sage de fractionner le talus comme dans le bouclier Beach. Il faudrait à chaque étage que la plate-forme joue le rôle de trousse coupante et soit constamment recouverte par le pied du talus des terres à l'étage supérieur. Le frottement à vaincre serait certes notablement augmenté, mais si l'effort à demander aux vérins se trouvait de ce fait exagéré, on pourrait munir comme au bouclier de station du Waterloo and City, ces plates-formes de vérins spéciaux.

L'avantage énorme que présenterait une installation de cette nature ressortira encore mieux lorsqu'il sera parlé des boucliers travaillant dans les terrains aquifères sur une partie seulement de leur hauteur.

Divisions verticales. — Les divisions verticales, comme celles dont il vient d'être question, peuvent jouer le double rôle de pièces confortatives de l'enveloppe et de divisions en cellules du front d'attaque.

Elles ont été employées pour la première fois, dans ce dernier but, dans des terrains vaseux de la deuxième catégorie à la rivière Saint-Clair et à l'Hudson ; elles diffèrent toutefois des divisions horizontales en ce qu'elles ne sont pas munies de trousses coupantes. Cette distinction est toute naturelle, puisque les terres, sous l'effet de l'eau et de la pesanteur, n'ont une tendance à s'ébouler qu'en plan. Les cloisons verticales du bouclier de Blackwall sont conçues dans le même esprit.

Dans la catégorie des cloisons purement confortatives rentrent celles du bouclier de station du Waterloo and City. L'absence de cloisons semblables dans les deux boucliers du collecteur de Clichy est peut-être à regretter.

Celle du bouclier de la rivière de l'Est qui, au premier examen, paraît inutile avec un aussi faible diamètre, a eu pour véritable objet de permettre le démontage en quadrants.

Le tableau ci-après donne les indications relatives à l'installation de ces cloisons dans les divers boucliers.

Il est à peine besoin de rappeler que ces divisions verticales et horizontales, les unes un peu en arrière et les autres munies de trousses coupantes, ne sont que la reproduction des planchers et des cadres du bouclier de Brunel.

DIVISIONS VERTICALES

DÉSIGNATION des boucliers.	DIAMÈTRE extérieur.	NOMBRE de divisions	OBSERVATIONS
	Mètres.		
Hudson	6,07	2	
Rivière Saint-Clair .	6,56	3	1 s'étend sur les 4 étages et les 2 autres sur les étages intermédiaires seulement.
Blackwall	8,23	3	
Rivière de l'Est.	3,35	1	

La cloison. — La cloison, qui isole l'avant-bec ou chambre de travail, a été imaginée par Peter William Barlow en vue de pouvoir arrêter l'invasion du souterrain par l'eau ou les déblais en cas de travail sous une rivière à l'air comprimé. Mais dans les boucliers du type dit Greathead, elle a cessé de pouvoir remplir ce but; on a si bien oublié sa raison d'être que l'on a fait passer à travers cette ouverture les étais soutenant le blindage du front de taille. Son rôle s'est borné à raidir et à consolider l'enveloppe, et à servir de base d'appui aux vérins d'avancement. Elle est généralement formée de tôles renforcées par des poutres et comporte de larges ouvertures normalement ouvertes qu'il est tout au plus possible de barricader, en cas d'accident.

Ce type de cloison se retrouve au souterrain de la Tour de Londres, au City and South London Railway, aux souterrains du port et du District Railway à Glasgow, aux siphons de Clichy et de la Concorde et au Waterloo and City. Ce n'est plus qu'un dispositif pouvant permettre d'enrayer un accident ou la rencontre imprévue d'un mauvais sol. Mais ce serait une erreur de s'en servir couramment en mauvais terrain comme on l'avait fait à Melbourne.

Dans les terrains durs, où l'invasion d'eau n'est plus à craindre la cloison a été franchement supprimée et les divisions horizontales et verticales jouent seules le rôle de renforcement de l'enveloppe. Tel est le cas du bouclier de station du Waterloo and City.

Avec des terrains dangereux, il faut, au contraire, diminuer les ouvertures et se tenir toujours prêt à les fermer. S'il s'agit

des terrains mous de la deuxième catégorie, elles doivent être réduites, soit à une porte unique en bas par où doivent s'écouler tous les déblais, comme au projet du North and South Woolwich, à la rivière Saint-Clair, à la Mersey, soit à un grand nombre de petites portes correspondant aux diverses cellules de la chambre de travail, comme à l'Hudson et à la rivière de l'Est.

Lorsque le terrain est très mauvais, il peut arriver qu'en présence d'une invasion violente, il ne soit pas possible de fermer les portes, si petites qu'elles soient; et il semble utile de les compléter par le système de trappe, déjà prévue par Greathead au souterrain de Woolwich et appliqué à la Mersey où il a rendu les plus grands services.

Reste le cas d'un terrain ébouleux, qui n'est cependant pas assez mou pour couler de lui-même et qu'il faut venir fouiller dans la chambre de travail (3e catégorie). Il y a lieu ici de distinguer deux cas : celui des terrains dangereux comme les sables et graviers aquifères sous une rivière ou à proximité de son lit, et celui des sables secs ou ne contenant de l'eau qu'en petite quantité. Dans ce dernier cas, des éboulements dont les conséquences seraient graves, peuvent être redoutés, mais ils s'arrêteront d'eux-mêmes, dès que les terres auront pris un talus plus ou moins allongé et la cloison devient parfaitement inutile; comme elle est évidemment une gêne pour l'évacuation des déblais, il vaut mieux la supprimer, comme cela a été fait dans le bouclier Beach de New-York et Cincinnati et dans les deux boucliers du collecteur de Clichy.

Avec les nappes aquifères abondantes, l'invasion totale de la galerie par l'eau et le sable constituerait un désastre, et il faut conserver la cloison et même s'assurer le moyen de pouvoir en fermer rapidement toutes les ouvertures, quelles que soient la rapidité et la violence de l'invasion. C'est dans ce but que Brunel avait subdivisé son front d'attaque en une série de petites cellules, de manière à pouvoir isoler la partie dangereuse; mais son mode de fermeture avec des boisages placés à la main contre les nervures des cadres était lent. Dans son premier brevet, il avait prévu une véritable cloison et il n'y renonça que lorsqu'il fut obligé de fractionner son bouclier. Il en subit les conséquences inévitables et le souterrain fut envahi à diverses reprises. Avec le

retour au bouclier d'une seule pièce, réapparut immédiatement et avec juste raison, la cloison; mais malheureusement cette cloison empêchait de consolider le blindage du front de taille. Il était impossible en effet de buter ce blindage contre le bouclier lui-même, sans arrêter l'avancement. On ne pouvait plus songer comme avec le bouclier de Brunel, à reporter la charge contre les parties du bouclier au repos; il parut donc indispensable d'aller chercher un point d'appui au delà de la cloison contre le revêtement définitif. C'est la solution du City and South London; elle avait le grave inconvénient de rendre impossible la fermeture de la cloison dont elle annihilait tous les avantages et devait fatalement aboutir à un désastre, comme celui de Melbourne. Pour tourner la difficulté, la première idée émise fut de renoncer à pénétrer dans la chambre de travail tenue constamment close par une cloison étanche, et d'effectuer le déblai en avant au moyen d'outils manœuvrés de l'arrière de la cloison qu'ils traversent dans des boîtes étanches. Tel fut le principe du déblai sous l'action d'un jet hydraulique projeté pour le souterrain de la Mersey, mais ce procédé ne pouvait réussir qu'avec un terrain absolument homogène. Son choix était particulièrement inapplicable à la Mersey où le sol variait constamment; aussi ne put-il fonctionner et dut-on se contenter de limiter les accidents par le système de la trappe? Une autre tentative de ce genre a été faite par M. Mackensen à Berlin; elle paraît s'être heurtée à une autre difficulté : les outils peuvent bien être appropriés à la nature du terrain à travailler, mais en somme leur fonction consiste à provoquer une série de petits éboulements successifs, dont rien ne permet de régler l'importance et de limiter l'étendue. Il est par suite inévitable que des affouillements se produisent en dehors de la section du souterrain et provoquent des tassements à la surface. La solution définitive paraît avoir été trouvée au Blackwall avec les volets, qui glissent sur leurs supports pendant que le bouclier avance, et dont il sera reparlé à propos du blindage du front d'attaque.

En résumé, sauf pour les terrains durs de 1re catégorie et les terrains ébouleux secs ou légèrement mouillés, la cloison est une nécessité; elle doit être munie d'ouvertures petites pouvant toujours être fermées rapidement.

Corps du bouclier. — Le corps du bouclier, qui comprend la partie entre la cloison et la queue n'a d'autre utilité que de loger les organes de cet engin, vérins, sas à air, grues de levage, pompes de compression, machines motrices, etc. En lui-même, il ne présente aucune utilité, constitue un excédent de poids coûteux et, en allongeant le bouclier, une gêne pour le passage dans les courbes. Il est utilisé cependant, pour reporter sur le terrain le poids du bouclier et des terres qu'il supporte, dans le cas d'un avant-bec en visière et de l'emploi d'une queue seulement à la voûte. Il faut en tout cas s'efforcer de raccourcir le plus possible cette région.

Dans les premiers boucliers, l'enveloppe a été renforcée, dans l'étendue du corps, à l'aide d'un fort anneau en fonte servant en même temps de logement aux vérins. Tel fut le cas des boucliers des souterrains de la Tour de Londres, du City and South London Ry, de la Mersey, de Glasgow, des siphons de Clichy et de la Concorde, du Waterloo and City Ry, et de tous les petits boucliers analogues. Mais cet anneau de fonte augmente très vite de poids avec le diamètre et doit bientôt céder la place à des goussets et à des poutres en fer et en tôle. Quand ce renforcement de l'enveloppe a déjà été adopté dans la chambre de travail, comme à l'Hudson, à la rivière Saint-Clair, à la rivière de l'Est, rien n'empêche de profiter de l'espace libre entre ces goussets et les deux enveloppes pour y placer les vérins, et le corps du bouclier disparaît, ce qui est une excellente solution. Elle suppose malheureusement qu'il n'y a pas d'autres engins à loger que les vérins. S'il est utile d'isoler la chambre de travail par des sas à air, s'il y a besoin de placer des pompes de compression et des moteurs, il faut conserver le corps du bouclier. La disposition du bouclier de Blackwall avec ses cloisons successives est parfaitement rationnelle, quoiqu'elle conduise à allonger le bouclier.

Il serait facile, au contraire, et désirable d'améliorer les dispositions des boucliers du collecteur de Clichy. Rien n'oblige d'abord à encombrer les planchers des compresseurs et des dynamos qui les conduisent. D'ailleurs, les deux énormes poutres elliptiques employées pour renforcer l'enveloppe, qui perdent énormément de place, peuvent être réduites. On verra plus loin qu'il eût été

facile de donner aux vérins un diamètre bien moindre, et, par suite de réduire au moins d'un tiers la hauteur de ces poutres. Mais il y a plus : si de solides divisions verticales et horizontales avaient été substituées aux poutres, il n'était plus nécessaire de demander à ces poutres de porter toute la charge, ce à quoi elles sont mal appropriées, puisqu'elles peuvent et doivent fléchir au risque de disloquer tout le système. De simples goussets auraient alors suffi pour porter les vérins. Ces derniers pouvaient être logés en partie dans l'avant-bec, ou tout au moins reculer jusqu'à l'emplacement de la première poutre actuelle; et, comme rien n'oblige à allonger indéfiniment leurs tiges, ainsi qu'il a été fait, ce n'est plus eux qui eussent exigé un corps bien long. Doit-on craindre qu'en raccourcissant ce corps, le bouclier ne s'enfonce dans le terrain sous la charge, et est-il nécessaire de l'allonger lorsque les saillies de l'avant-bec et de l'arrière-bec augmentent la surface du toit à soutenir? Cette crainte est absolument chimérique. Il a été démontré, à propos de la rivière Saint-Clair qu'un souterrain était beaucoup plus léger que la terre dont il occupe la place. Dans l'espèce, le cube fouillé par mètre courant est de 35 m^3 et, en prenant pour la terre un poids minimum de 1 600 kg. par mètre cube, la terre enlevée pèse 35 $\times$ 1 600, soit 56 t. par mètre courant, c'est-à-dire un poids presque égal à celui de tout le bouclier. Non seulement la charge sur le toit n'est pas dangereuse, mais elle devient même nécessaire pour empêcher le bouclier de se soulever, dès que le souterrain se trouve dans un terrain mou et fluide. Il n'y a en tout cas jamais lieu de craindre d'enfoncement dans les terrains meubles mais incompressibles comme les sables et les éboulis, et rien ne force à donner au corps une longueur exagérée de 3 à 4 m.

En résumé, dans ce type de bouclier, le corps doit être réuni à la chambre de travail, les grandes poutres elliptiques supprimées et remplacées par des divisions horizontales et verticales, les vérins attachés à ces divisions et à l'enveloppe par des goussets et reportés aussi près de l'avancement que le permettent les besoins du travail. Le corps se trouvera ainsi considérablement réduit de longueur ; ce qui donnera une grande économie de poids et plus de facilité pour passer dans les courbes.

Queue. — La queue sert à construire le revêtement définitif. Elle doit être absolument lisse pour glisser aisément entre ce revêtement et le terrain et aussi mince que possible pour éviter d'exagérer le vide qu'elle laisse en se retirant et de provoquer ainsi des tassements.

Avec le revêtement en fonte, elle a généralement une longueur égale à celle de un ou deux anneaux et s'étend sur tout le périmètre du souterrain.

Dans les terrains durs ou secs, dans lesquels la cloison est supprimée, cette dernière condition est souvent inutile et c'est avec raison qu'au bouclier du souterrain de Clichy la queue est limitée à la voûte et arrêtée au niveau des naissances. Elle est toutefois considérablement allongée, de manière à permettre d'exécuter simultanément 3 anneaux de maçonnerie ; mais, comme elle n'a besoin d'être lisse que sur la longueur du dernier anneau de voûte, rien n'a empêché de placer les renforcements que nécessitait la grande longueur de l'enveloppe. Ces renforcements ont consisté en goussets attachés à la poutre elliptique. Ces goussets sont fort encombrants et, à la traversée d'éboulis, ils ont fléchi. D'ailleurs avec la suppression demandée de cette poutre, ils ne pourraient plus exister. Il vaudrait bien mieux faire porter cette partie de l'enveloppe par les divisions verticales, coupées en léger surplomb, en intercalant de petites poutres beaucoup moins hautes. On assurerait ainsi une rigidité absolue avec infiniment moins de poids et d'encombrement.

Longueur totale. — La longueur totale dépend de la longueur de l'avant-bec ou chambre de travail, du corps et de la queue, qui viennent d'être étudiés successivement. Il suffira ici, sans reprendre la discussion, de donner un tableau récapitulatif des longueurs adoptées dans les divers boucliers. Il est toutefois intéressant de remarquer que cette longueur totale croît moins vite que le diamètre ; on sera donc au-dessus de la vérité en la supposant égale au diamètre.

Vérins. — Les vérins peuvent être examinés au triple point de vue de leur espacement, de l'effort que chacun d'eux peut déve-

lopper, de l'effort total disponible, de la pression et du mode de fourniture de l'eau employée. Les dispositions servant à reporter l'effort sur le revêtement définitif seront mieux à leur place avec l'étude de ce revêtement.

LONGUEUR DES BOUCLIERS

DÉSIGNATION des boucliers.	DIAMÈTRE	LONGUEUR				OBSERVATIONS
		De la queue.	Du corps.	De l'avant-bec.	Totale.	
	Mètres.	M.	M.	M.	M.	
Concorde.	2,06	0,765	0,78	0,355	2,035	
Clichy (siphon . . .	2,56	»	»	»	1,88	
Mersey.	3,04	1,71	0,91	0,91	3,53	
Rivière de l'Est. . .	3,35	1,07	0,10	1,12	2,29	Le corps se réduit à la cloison.
City and South London	3,35	0,81	0,86	0,31	1,98	
Glasgow District . .	3,68	»	»	»	1,98	
Waterloo and City. .	3,96	0,84	0,91	0,38	2,13	
Id.	3,96	0,84	0,91	1,14	2,89	
Glasgow harbour . .	5,26	»	0,91	0,33	2,59	
Hudson	6,07	1,47	»	1,73	3,20	Le corps se réduit à la cloison.
Saint-Clair	6,56	1,22	»	3,431	4,651	Id.
Clichy intra-muros .	7,25-6,04	»	»	2,10	5,25	
Clichy extra-muros .	7,28-5,92	2,275	3,635	1,365	7,215	
Blackwall.	8,23	2,13	1,80	2,01	5,94	
Waterloo station . .	7,58	1,02	1,68	0,35	3,05	

Il faut distinguer comme toujours trois groupes bien distincts : 1° les boucliers du genre Greathead, appropriés au travail en terrain dur comme l'argile compacte, dans lesquels le travail de fouille se fait dans une galerie boisée en avant du couteau et où l'effort à vaincre est faible ; 2° les boucliers, qui s'ouvrent eux-mêmes leur chemin dans un terrain mou, où l'effort à développer est, au contraire, très grand ; 3° enfin, les boucliers travaillant dans des terrains secs ébouleux, permettant de fouiller à la main au front d'attaque, de préparer le travail du bouclier, et, par suite, de réduire l'effort à développer.

Les renseignements relatifs à ces divers boucliers sont groupés dans le tableau ci-après :

Dans la première catégorie, les vérins sont alimentés par des pompes à bras et l'effort développé ne dépasse guère 4 à 5 t.

par mètre carré de surface de frottement. Avec la pression de 70 kg. par centimètre carré et le diamètre de 0,17 m. pour les vérins adoptés, généralement il suffit de les espacer de 1,75 m. en moyenne.

DISPOSITIONS DES VÉRINS

DÉSIGNATION des boucliers.	DIAMÈTRE	LONGUEUR	SURFACE de frottement.	NOMBRE de vérins.	ESPACEMENT	DIAMÈTRE des vérins.	PRESSION de l'eau par cm² en kilogr.	EFFORT développé par vérin en tonnes.	EFFORT total en tonnes.	EFFORT par m² de surface frottante en t.
				1re catégorie.						
	M.	M.			M.	M.	K.	T.	T.	T.
Concorde	2,06	2,035	13,16	4	1,62	0,165	70	15	60	4,5
Tour de Londres.	2,13	»	»	6	1,12	»	(vis)	10	60	»
Siphon de Clichy.	2,56	»	»	5	1,62	0,165	70	15	75	4,5
City and South London	3,35	1,98	20,83	6	1,76	0,165	70	6 à 27	90	4,3
Glasgow District.	3,68	1,98	22,88	6	1,92	»	56 à 154	15	90	4
Waterloo and City	3,96	2,13	26,49	7	1,78	0,178	70	17,5	122	4,6
Glasgow (port). .	5,26	2,59	42,78	13	1,25	0,178	70	17,5	228	5,3
				2e catégorie.						
Mersey	3,04	3,53	33,70	10	0,95	0,178	70 à 280	18 à 70	180 à 700	5,3 à 20,8
Rivière de l'Est. .	3,35	2,29	24,09	12	0,88	0,127	350	45	540	22,4
Hudson	6,07	3,20	69,99	16	1,19	0,203	280	88	1 400	23,1
Saint-Clair. . . .	6,56	4,65	95,78	24	0,86	0,203	144	44	363 à 1 633	4,2 à 19
Blackwall	8,23	5,94	153,50	28	0,92	0,203	315 à 430	100 à 135	2 800 à 4 000	18,2 à 26
				3e catégorie.						
Clichy extra-muros	7,25×3,04	5,25	57,52	6	1,50	0,24	50 à 200	22,5 à 90	135 à 540	2,4 à 9,4
Clichy intra-muros	7,28×5,92	7,215	108,34	6	2,60	0,24	50 à 280	22,5 à 127	135 à 762	1,25 à 7,3
Waterloo (station)	7,58	3,05	72,59	22	1,08	0,178	140	30	660	9,1

Dans la deuxième catégorie, l'effort atteint et même dépasse 25 t. par mètre carré de surface de frottement. Les vérins sont rapprochés à 0,90 m. environ d'axe en axe. Leur diamètre restant sensiblement le même et ne dépassant pas 0,20 m., la pression de l'eau est portée à 3 ou 400 kg. par centimètre carré. Avec d'aussi fortes pressions, les pompes à bras deviennent impuissantes ; il faut

mettre l'eau en pression dans de véritables usines à la surface et la transporter jusqu'au bouclier par une tuyauterie spéciale.

La troisième catégorie n'a encore que peu de représentants ; il semble que l'effort à faire devra s'élever à 10 t. par mètre carré. En France, aux travaux du collecteur de Clichy le diamètre et l'espacement des vérins a été exagéré, ce qui a entraîné une série d'inconvénients déjà signalés ; il ne semble pas sage de dépasser les quantités admises dans la deuxième catégorie. L'emploi de moteurs électriques a permis d'installer les pompes sur place et de supprimer la tuyauterie d'eau sous pression toujours compliquée et coûteuse.

Les divers détails de fonctionnement et de robinetterie des vérins ont été longuement décrits, et il n'y a pas lieu d'y revenir. Il suffira de rappeler que si les vérins étaient en fonte ordinaire, leurs parois auraient une épaisseur telle que l'exécution en serait difficile. Il est donc préférable de les faire en fonte d'acier.

Poids des boucliers. — Les boucliers de la première catégorie sont relativement légers ; leur poids varie de 2 à 6 t., soit de 1 à 2 t. par mètre de diamètre.

Les boucliers de la deuxième catégorie sont plus longs et surtout ils ont à subir et à transmettre des efforts beaucoup plus considérables ; ils doivent, par suite, être bien plus vigoureux et plus lourds. Il résulte du tableau suivant que les poids augmentent très rapidement avec le diamètre, sans qu'il soit encore possible de dégager une loi bien nette. Il semblerait que le poids fût sensiblement égal au cube du diamètre multiplié par 1/3, mais cette conclusion est peut-être prématurée.

Quant à la troisième catégorie, les boucliers sont à peine plus légers que les précédents, 65 t. à Clichy et 100 t. au bouclier de station à Waterloo ; mais le premier devrait être modifié et allégé, comme on l'a indiqué, et le second est alourdi par des anneaux en fonte qui servent à raidir l'enveloppe.

Blindage du front d'attaque. — Cette question a déjà été examinée à propos de la cloison; il serait donc inutile d'y revenir, s'il ne s'agissait d'une des plus grosses difficultés du travail.

En effet, toutes les fois que le travail doit s'effectuer dans des terrains coulants, il faut toujours redouter de graves accidents comme l'invasion du souterrain, ou tout au moins des éboulements qui ont encore pour conséquence immédiate des tassements à la surface.

POIDS DES BOUCLIERS

DÉSIGNATION DES BOUCLIERS	DIAMÈTRE	POIDS
	Mètres.	Tonnes.
Rivière de l'Est	3,35	12
Hudson	6,07	80
Saint-Clair	6,56	72,6
Blackwall	8,23	220

En supprimant le blindage et en laissant s'écouler les terres librement par les ouvertures ménagées dans la cloison, en les attaquant par des outils mécaniques, manœuvrés derrière cette cloison sans pouvoir en contrôler l'effet, l'invasion peut bien être enrayée, mais les tassements sont inévitables et il faut compter avec eux. Sauf le danger qu'ils entraînent et contre lequel garantissent la cloison et ses fermetures, ces tassements n'ont pas grand inconvénient sous une rivière, et rien n'a été fait pour s'en prémunir à l'Hudson, à la rivière Saint-Clair, à la Mersey et à la rivière de l'Est, c'est-à-dire dans les terrains de deuxième catégorie.

Brunel avait cependant compris ce qu'il y avait de vicieux dans cette manière de faire et il avait installé un blindage au front de taille. Il avait pu prendre point d'appui pour ce blindage contre les cadres au repos pendant qu'on avançait les autres; mais, faute d'un outillage suffisant, il avait dû se contenter de vérins difficiles à placer, d'un maniement lent et dangereux. L'accident du 12 mai 1827 avait été dû, on s'en souvient, à l'absence, en temps utile, d'un vérin de longueur convenable. Après Brunel, avec le bouclier mû d'une seule pièce, le point d'appui manqua en avant de la cloison, et il fallut aller le chercher au delà, sur le revêtement définitif. Le danger de cette façon de faire a été démontré.

C'est au souterrain de Blackwall que, pour la première fois, a été appliquée une solution rationnelle. Les blindages de Brunel ont été repris et fixés sur des écrous traversés par de longues vis sans fin attachées au bouclier, ce qui a permis d'éviter les phénomènes de déversement tant redoutés par Brunel et de les maintenir dans telle position que de besoin. Quand le bouclier avance, les écrous sont desserrés et les planches de blindage restent en place; inversement ils servent à obtenir un mouvement relatif de ces planches par rapport au bouclier immobile. C'est certainement la solution la plus ingénieuse et la plus simple qui ait été imaginée. Elle paraît résoudre complètement le problème. Un pareil dispositif permet d'exécuter le déblai avec une exactitude presque mathématique et, à moins d'avoir affaire aux violentes poussées déterminées par une forte charge d'eau, avec du soin, tout tassement doit être évité.

Dans les terrains ébouleux secs avec le bouclier à visière, le blindage est généralement inutile, à condition de ne pas provoquer d'éboulements en raidissant le talus par une attaque imprudente. Il suffit de décaper constamment la terre comme avec un excavateur suivant ce talus, soit sur toute la hauteur du bouclier, soit, ce qui vaut mieux, dans chaque étage considéré comme un bouclier distinct. Il suffit pour cela, comme il a déjà été dit, de munir les planchers d'une trousse coupante et de tenir le pied du talus sur chacun d'eux en arrière de la crête dans l'étage immédiatement inférieur.

Dispositions relatives à l'emploi de l'air comprimé. — L'air comprimé est indispensable dans les terrains ébouleux de la troisième catégorie, lorsqu'il y a lieu de redouter l'invasion du souterrain par l'eau. Mais, en raison de la hauteur de la fouille, il est impossible d'obtenir sur toute sa surface une pression exactement égale à la charge d'eau. Une pression suffisante pour maintenir l'eau dans le bas provoque dans le haut des pertes d'air. Ces échappements souvent violents peuvent soulever la couche de terre au-dessus du toit, ouvrir passage à l'eau si l'on est sous une rivière ou faire sauter la chaussée si on travaille sous une rue. Avec une pression seulement égale à la hauteur d'eau au-dessus de l'ouvrage,

de forts écoulements se produisent dans le bas et entraînent, comme dans le premier cas, la formation d'affouillements par où l'eau viendrait noyer le souterrain, ou la création de tassements dangereux à la surface.

Les boucliers ayant été surtout employés pour le passage sous les rivières, les précautions à prendre dans ce genre de travaux ont été l'objet des premières recherches. On a vu au chapitre II que Barlow avait eu soin de limiter l'ouverture dans la cloison à une certaine hauteur en contrebas du sommet de l'enveloppe. Il espérait ainsi pouvoir toujours conserver dans le haut du souterrain une couche d'air comprimé qui maintiendrait l'eau au niveau du sommet de l'ouverture. Les ouvriers pourraient, en cas d'irruption d'eau, échapper à la mort grâce à cette cloche à air. Dans la suite, pour faciliter le travail, les dimensions de l'ouverture ont été exagérées et, comme en même temps, elle était encombrée d'étais, ce qui ne permettait plus sa fermeture rapide, le désastre de Melbourne a pu se produire. Cet inconvénient s'atténue, il faut le reconnaître, avec le diamètre; il est particulièrement grave au souterrain de la Tour, aux siphons de Clichy et de la Concorde où l'on ménage une ouverture de 1,80 m. dans des souterrains de moins de 2,50 m. Il devient moindre au City and South London, au Glasgow District, au Waterloo and City dont le diamètre varie de 3,35 m. à 3,96 m.; la hauteur de l'ouverture restant de 1,80 m., il reste au dessus une cloche dont la hauteur varie de 0,75 m. à 1,10 m. Le système de la trappe du souterrain de la Mersey, avec l'ouverture dans la cloison réduite au minimum de hauteur et placée tout en bas, constitue seule la première application raisonnée de l'idée de Barlow. Un principe analogue mais d'une application moins complète avait conduit, à la rivière Saint-Clair, à n'ouvrir dans la cloison que deux portes en bas par où s'effectuait l'évacuation des déblais jetés des diverses plates-formes. Cette disposition donnait bien une grande sécurité dans le souterrain lui-même, mais elle ne protégeait nullement les mineurs occupés à la fouille sur les divers planchers. Leur situation était même d'autant plus dangereuse, qu'en cas d'accident, il leur aurait été sans doute très difficile de gagner ces portes promptement obstruées par l'eau et les terres.

Dans un projet primitif du bouclier du souterrain de l'Hudson (fig. 336), Sir Benjamin Baker avait prévu dans les chambres de travail, à chaque étage, à peu près à mi-distance entre le couteau et la cloison, des écrans partant du toit et descendant jusqu'au-dessous du niveau du seuil de chacune des ouvertures très petites ménagées dans la cloison. Dans ces conditions, les hommes auraient pu se réfugier derrière l'écran et s'échapper par les ouvertures maintenues au-dessus du niveau de l'eau à chaque étage. En raison de la nature de la vase, qui devait pouvoir s'écouler librement par les portes, sans qu'on pénétrât en avant de la cloison, ce dispositif a été abandonné.

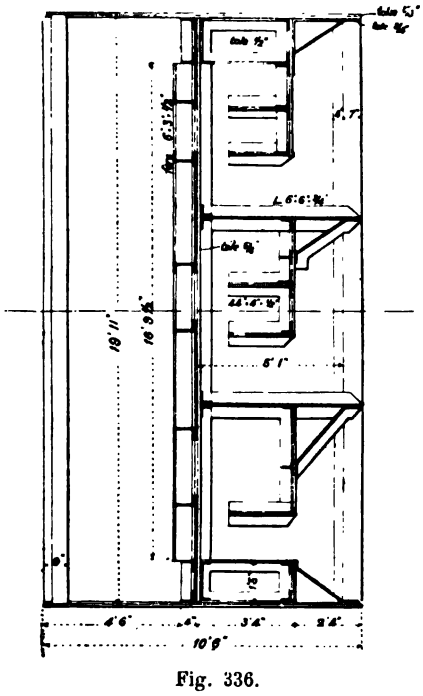


Fig. 336.
Projet de bouclier pour l'Hudson.

Il a été, au contraire, appliqué au souterrain de Blackwall, où les chambres de travail sont munies d'écrans de cette nature à chaque étage. En outre, dans l'exécution de cet ouvrage, en raison de son diamètre considérable, le constructeur était très préoccupé de la différence de pression d'environ 0,8 kg. entre le bas et le haut, surtout pour le passage dans les graviers très perméables à une distance excessivement réduite au-dessous du fond du lit. Il a dédoublé la cloison de manière à la transformer en sas à air et ménagé quatre écluses pour la traverser, deux au 1er étage et deux au 4e étage ; de petits couloirs à chaque étage, formant sas à déblais, permettaient l'évacuation de ces déblais, sans perte d'air appréciable. Cette cloison étanche permettait déjà de ne conserver la pression la plus forte que dans les chambres de travail et de diminuer la fatigue des équipes d'ouvriers occupés dans le souterrain. Mais en plus il avait construit le deuxième plancher, de manière qu'il fût étanche à l'air et cela dans le but de pouvoir maintenir une pression moins forte dans

les deux étages du haut que dans les deux du bas, ce qui aurait considérablement diminué le danger.

Cependant, en pratique, l'entreprise ne paraît avoir tiré aucun profit de cette disposition et s'est borné à maintenir une pression uniforme un peu basse, malgré les fortes rentrées d'eau qui en résultaient dans le bas. Les ingénieurs n'en ont pas donné les motifs; mais il y en a un qu'il est facile de comprendre. Le couteau était dans un plan vertical et la fouille était taillée elle-même verticalement derrière les blindages jusqu'à l'aplomb du couteau. Avec un terrain de gravier très perméable, l'air pouvait facilement passer à travers la couche très mince de ce terrain devant l'arête tranchante du plancher et la pression s'égaliser. L'idée ne peut au contraire être appliquée qu'à la condition que les fouilles aux deux étages soient constamment isolées l'une de l'autre par une épaisseur suffisante de terre.

Est-ce à dire qu'il faut y renoncer? Dans le passage sous les rivières, dans les terrains nécessitant un couteau et des blindages verticaux, évidemment oui. Mais il reste le cas du passage sous les rues des villes, où il faut éviter avec autant de soin de laisser l'eau provoquer des affouillements que de faire sauter la chaussée. Le problème est d'autant plus intéressant dans ce cas que, généralement, le travail est effectué à fleur de sol, et que l'ouvrage ne plonge que partiellement dans la nappe d'eau. La partie haute dans le voisinage de la chaussée, souvent composée de remblais et de gravats incomplètement tassés, permettra difficilement de maintenir l'air comprimé en pression; il s'échappera dans la partie sèche en abondance, par les vides et au long des vieilles maçonneries que l'on rencontre à chaque instant. D'autre part, toute rentrée d'eau dans le bas, tout épuisement, si le terrain est sablonneux, causeront inévitablement des affouillements et des tassements des plus dangereux. Il faut donc prévoir le fractionnement du bouclier en étages, dans lesquels le travail s'effectuera à des pressions différentes. Pour assurer l'étanchéité avec le type à visière et la fouille en talus en chaque étage, il suffit que le pied du talus de l'étage supérieur recouvre le toit de l'étage du dessous d'une quantité suffisante pour éviter les pertes d'air devant l'arête tranchante du plancher. Il sera bon, en outre, d'appliquer le principe

indiqué par Brunel et repris par M. Hay au Waterloo and City et de garnir, devant cette arête, une rigole préparée à l'avance, d'argile bien malaxée, de manière à limiter les pertes d'air. Dans ces conditions, il sera possible d'avoir plusieurs chambres superposées, bien isolées les unes des autres. Sans entrer dans aucun détail de construction, ni indiquer de quelle manière peut être résolu ce problème, il ne semble pas qu'il y ait impossibilité à le faire, en utilisant les meilleures parties des boucliers, qui ont déjà fait leurs preuves.

CHAPITRE XVI

LE REVÊTEMENT

La méthode du bouclier permet l'exécution du revêtement définitif à l'abri même de l'appareil. Les dispositions du bouclier doivent donc être appropriées à la forme et à la nature du revêtement.

Forme. — Depuis le brevet Barlow, en 1868, jusqu'à la construction toute récente du collecteur de Clichy, en Angleterre et en Amérique, la forme circulaire a été invariablement adoptée. Cependant Barlow n'y avait été conduit par aucune idée théorique, mais tout simplement parce qu'il voulait étendre aux souterrains l'emploi de l'air comprimé déjà appliqué aux fondations de ponts qui affectaient à cette époque exclusivement la forme tubulaire.

Cette forme tubulaire pour les fondations dérivait elle-même des anciens puits ronds, qui de tout temps ont servi pour supporter les ouvrages établis sur un mauvais sol. Les constructeurs ont depuis longtemps renoncé pour les ponts à cette tradition et fait des caissons de fondation de toutes les formes. Comment se fait-il que pour les souterrains ils n'aient pas réalisé le même progrès? La forme circulaire, qui a l'avantage de présenter la plus grande surface avec le moindre périmètre, s'expliquerait à la rigueur pour des souterrains-aqueducs, comme les siphons de Clichy et de la Concorde ; mais elle est très désavantageuse pour tout autre usage et surtout pour les chemins de fer et les routes, qui ont besoin d'une partie horizontale en haut et en bas, et pour lesquels on adopte, partout ailleurs, une forme aplatie.

Il est au moins étrange de voir, à la rivière de l'Hudson, les

constructeurs, après avoir descendu à l'air comprimé sur chaque rive des caissons rectangulaires, après avoir construit par les procédés Haskin et du pilote de grandes longueurs de souterrain avec la forme elliptique (fig. 77) adopter la forme circulaire, dès qu'ils ont eu recours au bouclier et au revêtement métallique. Il en a été de même plus récemment à la rivière de l'Est. Y a-t-il donc des motifs graves pour accepter une semblable sujétion ?

On pourrait le croire en voyant les Anglais, qui avaient construit au City and South London Ry par les procédés ordinaires des stations de forme aplatie, revenir à la forme circulaire dans la station analogue du Waterloo and City Ry, exécutée avec un bouclier, et, ce qui est plus caractéristique encore, prendre, pour le souterrain de Blackwall, cette même forme ronde. Son emploi leur a fait faire au-dessous de la chaussée une fouille bien inutile ; elle leur a donné au-dessus un grand excès de hauteur sans objet et, surtout en rapprochant l'extrados du fond du lit de la Tamise, il a accru les difficultés et la dépense dans des proportions énormes.

Voici les motifs que donnait Greathead de ce choix :

« La forme circulaire est celle qui convient le mieux avec le revêtement métallique. Dans un fluide parfait, en supposant le poids du souterrain égal à celui du fluide déplacé, le revêtement circulaire ne subirait aucun effort de flexion et serait le meilleur en théorie comme en pratique. Dans un sol insuffisamment fluide pour couler autour du souterrain, la forme circulaire serait encore la meilleure ; car le terrain offrirait un point d'appui suffisant pour éviter les déformations et il ne se développerait aucun effort de flexion ; tel est le cas de l'argile de Londres et de toutes les argiles et les sables. Dans les terrains mous comme la vase et les glaises très tendres, la forme circulaire serait le siège d'efforts de flexion; mais plus la matière serait fluide, plus ces efforts seraient faibles. »

Ainsi Greathead reconnaît que dans le cas des terrains mous la forme circulaire n'évite pas les efforts dans le revêtement. A la rivière Hudson, en effet, des efforts fléchissants considérables se sont produits et ont obligé à consolider le revêtement par des tirants horizontaux ; l'ingénieur M. Moir a émis l'avis que la forme elliptique plus haute que large (c'est-à-dire précisément celle que l'on appliquait avant le bouclier), eût été plus rationnelle.

Dans un terrain ferme, la forme circulaire n'échapperait aux efforts que grâce à la butée des terres. Mais on peut en dire autant de toute forme aplatie, du moment que le revêtement peut prendre appui sur le terrain ; si tous les vides laissés par la fouille ont été soigneusement remplis, ce dernier ne peut se déformer et devenir le siège d'efforts dangereux.

Reste le cas d'un fluide parfait. On pourrait passer outre, car il est bien théorique ; mais, en admettant l'hypothèse irréalisable d'un souterrain de poids égal au fluide déplacé, il y aurait, contrairement à l'affirmation de Greathead, des efforts d'autant plus grands que la section serait plus considérable ; car on ne peut négliger la différence de pression développée par la pesanteur dans le fluide à différentes profondeurs.

Il est donc impossible d'éliminer les efforts de flexion. Il faut d'autant moins y compter que les efforts auxquels est soumise l'enveloppe, sont très difficiles à déterminer et toujours basés sur des hypothèses, relativement au caractère et à la poussée des terres.

Greathead a donné un autre motif qui a plus de valeur, mais uniquement en ce qui concerne les revêtements métalliques. Avec la forme circulaire, toutes les pièces sont interchangeables, et la construction plus aisée et plus rapide. Il aurait pu ajouter que cette forme seule permet de briser les joints horizontaux, et que, si l'on voulait appliquer ce mode de construction, excellent au point de vue de la résistance avec tout autre type, il faudrait encore multiplier le nombre des pièces de modèles différents.

En réalité, c'est le seul argument un peu sérieux, étant bien entendu que l'on ne parle que des formes à courbes douces et que l'on évite les coudes brusques, qui seraient soumis à des efforts considérables et obligeraient à donner au métal de fortes épaisseurs. Mais cette unique raison ne s'applique plus au cas du revêtement en maçonnerie.

D'autre part, on peut objecter à la forme circulaire, qu'elle facilite le mouvement de rotation du bouclier, partout constaté, même sur le pilote du souterrain de l'Hudson, sans qu'on ait jamais pu l'enrayer. L'expérience du collecteur de Clichy a montré, au contraire, que cette rotation était naturellement empêchée par la résistance même des terres, dès que la section circulaire était aban-

donnée, ou que, si elle avait une tendance à se manifester, la moindre charge suffisait à l'arrêter.

On est donc en droit de conclure qu'avec le revêtement en maçonnerie la forme circulaire doit plutôt être évitée, et qu'avec le revêtement métallique, avant de l'adopter, il faut étudier si les désavantages de cette forme, les déblais inutiles qu'elle entraîne et l'excès de hauteur et de largeur, qui en sont la conséquence, compensent la légère sujétion d'emploi de pièces spéciales, ne pouvant se remplacer réciproquement, et l'accroissement du poids du métal sur certains points. L'exemple du souterrain d'Anvers montre qu'une forme différente est réalisable.

Composition du revêtement métallique en fonte. — Les anneaux du revêtement métallique se composent d'un certain nombre de segments semblables entre eux et d'une clef. Le tableau ci-après donne un grand nombre de renseignements relatifs à ce revêtement. Sauf au souterrain de Blackwall, où le grand poids des segments obligeait en tout cas à se servir pour leur maniement d'engins mécaniques, la longueur des anneaux a été partout fixée environ à 0,50 m. Pour la même raison, le nombre des segments, qui était déterminé pour en réduire le poids, a été relativement plus faible au souterrain de Blackwall. Quant à la clef, une largeur d'environ 0,25 m. a été à peu près uniformément adoptée.

Chaque segment est entouré, sur ses quatre côtés, de nervures qui servent à le renforcer et à l'assembler avec les segments voisins ou la clef. La hauteur de ces nervures paraît avoir été en moyenne fixée, en centimètres, à quatre fois le diamètre en mètres, avec un minimum de 9 à 10 centimètres nécessaire pour pouvoir placer les boulons. Ces derniers ont un diamètre de 20 à 25 mm., sauf deux exceptions dont une, au souterrain de Blackwall, s'explique par les grandes dimensions et le poids considérable des segments.

Le poids du revêtement croît très rapidement avec le diamètre. Il résulte du tableau ci-après que suivant que le terrain peut exercer des pressions plus ou moins fortes, ce poids a été fixé en tonnes au 1/3 ou au 1/4 du carré de diamètre extérieur. Dans l'argile de Londres, les revêtements avaient même un poids inférieur à celui

DÉTAILS, DIMENSIONS ET POIDS DES REVÊTEMENTS EN FONTE

DÉSIGNATION des ouvrages.	DIAMÈTRE		LONGUEUR des anneaux.	SEGMENTS		CLEF		HAUTEUR des nervures.	ÉPAISSEUR du métal.		BOULONS				POIDS	
											NOMBRE			DIAMÈTRE		
	Extérieur.	Intérieur.		Nombre.	Développement.	Nombre.	Développement.		Segments.	Nervures.	Par segment. Joints horizontaux.	Joints verticaux. Par segment.	Joints verticaux. A la clef.		Par anneau.	Par mètre courant.
	M.	M.	Cent.		M.			Cent.	Millim.	Millim.				Millim.	Kilogr.	Kilogr.
Égouts de Glasgow.	1,41	1,22	45,7	5	1,80	1	»	9,5	19	»	»	»	»	»	»	»
Siphon de la Concorde . . .	2,00	1,82	50	4	1,20	1	28	9	20	23	3	5	1	20	661	1 332
Tour de Londres.	2,13	2,01	45,7	3	2,00	1	»	6	22	»	»	»	»	»	660	1 418
Siphon de Clichy	2,50	2,30	50	5	1,40	1	24	10	25	25	4	7	1	25	1 081	2 162
Kingston	2,74	2,54	45,7	6	1,30	1	25	10	22	32	2	6	1	25	1 075	2 352
Mersey	3,05	2,74	45,7	10	0,91	1	25	15,5	42	42	»	»	»	»	2 082	4 556
Rivière de l'Est	3,30	3,10	40,6	9	0,91	1	20	10	32	32	»	»	»	25	1 500	3 500
City and South London Ry.	3,33	3,11	50,8	6	1,60	1	23	11	25	30	»	7	1	25	1 400	2 800
Id.	3,43	3,20	50,8	6	1,64	1	23	11,5	22	30	»	7	1	20	1 400	2 800
Glasgow District Subway. .	3,66	3,35	45,7	9	1,25	1	23	15,5	25	25	2	5	1	25	1 524	3 334
Waterloo and City Ry . . .	3,96	3,70	50,8	7	»	1	»	13	22	30	2	8	1	25	1 758	3 460
Id.	4,14	3,88	50,8	7	»	1	»	13	22	30	2	8	1	25	1 839	3 620
Blackton	»	4,11	53	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
Glasgow (port).	5,18	4,88	45,7	13	1,23	1	27	15	25	»	2	5	1	»	3 099	6 781
Edimbourg	5,34	4,98	45,7	14	1,34	1	23	18	44	36	»	»	»	36	4 826	10 561
Hudson.	5,94	5,48	45,7	9	»	1	»	23	32	38	»	»	»	»	4 350	9 519
Rivière Saint-Clair.	6,40	6,04	46,3	13	1,52	1	25	18	51	60	4	12	1	22	6 250	13 900
Waterloo (station).	7,47	7,01	45,7	14	»	1	»	23	»	»	»	»	»	»	»	»
Blackwall.	7,92	7,62	76	14	»	1	»	15	38	50	»	»	»	»	11 938	15 709
Id.	8,23	7,62	76	14	»	1	»	30,5	51	64	»	»	»	38	16 764	22 060
Montage d'un bouclier . . .	9,25	8,53	»	»	»	»	»	36	»	»	»	»	»	»	»	»

que donnerait la formule. Le tableau fait, en outre, ressortir trois anomalies : à l'Hudson, où la poussée de la vase était très forte, le poids du revêtement est à peine supérieur à celui qui aurait convenu à un bon terrain, et il a été reconnu trop faible en pratique ; à Edimbourg, des circonstances locales ont fait chercher un excès de solidité ; à la Mersey, le poids de fonte a été certainement exagéré.

Malgré ces quelques exceptions, la formule indiquée paraît donner très approximativement le poids à prévoir.

POIDS RÉELS ET THÉORIQUES DES REVÊTEMENTS EN FONTE

DÉSIGNATION des ouvrages.	DIAMÈTRE extérieur a.	$1/3\,a^2$	$1/4\,a$	POIDS réel.	OBSERVATIONS
				Tonnes	
Concorde	2,00	1,3	»	1,3	
Tour de Londres	2,13	1,5	»	1,4	
Clichy	2,50	2,1	»	2,2	
Kingston	2,74	2,5	»	2,3	
Mersey	3,05	3,1	»	4,5	Poids excessif.
Rivière de l'Est	3,30	3,6	»	3,5	
City and South London Ry.	3,33	»	3,5	2,8	Très bon terrain, poids faible.
Id.	3,43	»	3,7	2,8	
Glasgow district subway.	3,66	»	3,35	3,33	
Waterloo and City Ry.	3,96	»	3,9	3,5	Même observation.
Id.	4,14	»	4,3	3,6	
Glasgow (port)	5,18	»	6,7	6,8	
Edimbourg	5,34	9,5	»	10,6	Poids exagéré.
Hudson	5,94	11,27	8,8	9,5	Poids insuffisant.
Rivière Saint-Clair	6,40	13,6	»	13,9	
Blackwall faible	7,92	»	15,7	15,7	
Blackwall fort	8,23	22,6	»	22,06	

L'épaisseur du revêtement est la conséquence du poids et ne saurait motiver de nouvelles observations. Il y a lieu seulement de remarquer que jamais l'épaisseur n'est moindre de 20 mm.

Joints. — Les joints sont de deux natures : les joints verticaux entre deux anneaux consécutifs, et les joints horizontaux entre les segments d'un même anneau.

Les joints verticaux ne sont soumis qu'à des efforts de cisaillement auxquels doivent résister les boulons ; ils doivent être en outre bien étanches et permettre de petites variations de direc-

tion pour le passage dans les courbes de grand rayon ou de légères rectifications d'alignement. Il existe 4 types de joints (fig. 337), qui d'ailleurs sont également usités pour les joints horizontaux.

Dans le joint A, les nervures ont leurs faces rabotées et l'étanchéité est assurée, par l'introduction de ciment métallique, dans une rainure peu profonde ménagée dans la partie intérieure du joint. Il est excellent mais un peu rigide, et oblige à recourir dans les courbes à des anneaux spéciaux.

Le joint B, également raboté, comporte l'interposition d'une

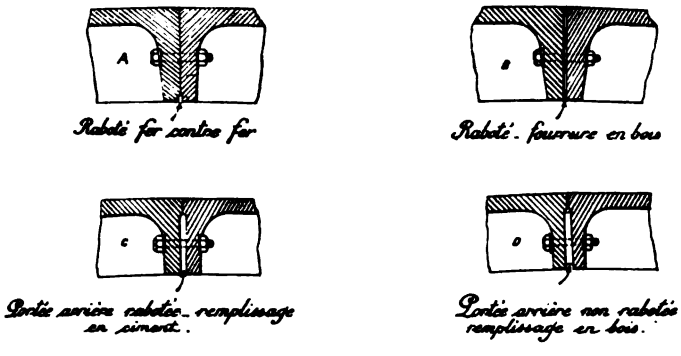


Fig. 337. — Dispositions diverses des joints.

fourrure en bois dont l'épaisseur peut varier, ce qui donne plus de souplesse. Il a le défaut de ne pas être très étanche et de comprendre une partie périssable ; mais, en remplaçant, après la pose, le bois par du ciment sur une petite profondeur, il donne d'excellents résultats.

Dans le joint C, il y a une très faible partie rabotée et une rainure profonde remplie de ciment. Ce type représente aggravés les défauts du joint A, et, quoiqu'il ait été employé, ne convient nullement aux joints verticaux.

Enfin le joint D rappelle le deuxième joint B avec une portée non rabotée dont l'utilité n'est pas démontrée. C'est donc sans contredit le joint B, rabotté avec fourrure en bois et scellement au ciment, qui paraît le meilleur.

Pour les joints horizontaux, la question est beaucoup plus com-

plexe. Les anneaux tendent déjà à fléchir sous leur propre poids. Mais la poussée due aux terres est souvent très inégale dans les terrains mous et les causes de déformation sont multiples : en tout cas, les efforts développés sont très variables. Dans ce cas, le joint A est incontestablement le meilleur et après lui le joint B. Les dispositifs C et D, quoique très employés, conviennent mal aux joints horizontaux. Si les portées ne sont pas en contact, la partie la plus solide de la nervure reste inutilisée. Si elles sont amenées au contact au moment de la pose, en serrant fortement le bois ou la garniture du joint, il se développe une pression souvent exagérée sur la partie interne des nervures ; si pour éviter ce défaut le garnissage est aminci, comme il est moins résistant que la fonte, il s'écrase sous la pression et l'anneau se déforme. Il faut alors, comme à Glasgow, mettre des coins, au risque d'exagérer encore la pression dans la partie interne et de briser les nervures.

Pour les joints horizontaux, il faut donc préférer sans hésitation les joints rabotés ; la dépense qu'entraîne cette main-d'œuvre, est d'ailleurs peu élevée avec les moyens dont dispose l'industrie.

Il y a, en tout cas, avantage à briser ces joints pour éviter les déformations.

Qualités et défauts du revêtement en fonte. — Le revêtement en fonte, quand il est bien fait, est très étanche. Il a, en outre, l'avantage d'être, même avec les nervures, peu épais et de n'exiger qu'un très faible supplément de fouille au-delà du diamètre utile. Le rapport de la fouille nécessaire à la fouille utile varie de 1,15 à 1,30 suivant le diamètre.

Il a surtout l'avantage de se monter très vite et à l'abri de la queue du bouclier, sans subir aucune dislocation quand on avance ce dernier.

Son défaut est de pouvoir fléchir et, en se déformant, de perdre beaucoup de sa résistance, surtout quand les joints ne sont pas bien compris. C'est ainsi que les anneaux du revêtement du souterrain de l'Hudson de 5,48 m. de diamètre intérieur, assemblés à l'air libre avec des joints garnis de bois tendre, fléchissaient de 0,05 m. sous leur propre poids. Les anneaux du souterrain de la rivière de l'Est de 3,35 m. de diamètre avec joints rabotés fléchis-

saient encore de 1,3 cm. sous une faible charge de 7 t. La fonte expose donc à des tassements appréciables.

Mais le plus grand défaut de ce revêtement est le poids énorme de métal qu'il exige, dès qu'il est appliqué à des diamètres un peu élevés. Le poids, et par suite la dépense, croît comme le carré du diamètre.

Aussi a-t-on essayé de faire l'enveloppe métallique beaucoup plus mince et de demander à un revêtement intérieur en maçonnerie la résistance nécessaire. Malheureusement ces deux natures de revêtement ne travaillent pas dans les mêmes conditions et il est impossible de répondre que, sur certains points, tout l'effort ne se portera pas sur l'un d'eux ; cette incertitude oblige à compter pour la résistance sur la fonte ou la maçonnerie seule ; l'une des enveloppes devient superflue et les dépenses se trouvent augmentées sans profit.

Revêtement en fer. — Le revêtement en fer a été employé avec un remplissage en maçonnerie, comme revêtement provisoire, à l'Hudson et à la rivière de l'Est ; mais il est trop faible et se déforme sous la poussée des terres, avant même que le revêtement en maçonnerie ait pu être construit. Aussi paraît-il abandonné.

A Berlin, sous la Sprée, un revêtement métallique en fer capable de résister par lui-même a été essayé ; il paraît avoir été assez fort, mais la différence de résistance à la pression du fer et de la fonte est faible, et il est douteux que la diminution de poids suffise à compenser la différence de prix. En outre, la diminution de poids et l'emploi du fer conduisent à un revêtement qui doit certainement prendre une flèche beaucoup plus forte qu'avec la fonte : c'est dire que, sans grands avantages, cette solution exagère un des défauts du revêtement métallique. C'est sans doute une des nombreuses raisons qui ont déterminé les tassements observés à Berlin.

Dans les puits, l'emploi de deux enveloppes, avec remplissage en béton, a bien permis d'obtenir, avec économie, l'étanchéité, la rapidité et le poids ; mais le fer n'y joue qu'un rôle de chemise de protection temporaire pour le béton, et, en réalité, c'est la maçonnerie, et non le fer qui, dans ce cas, constitue le revêtement.

Le revêtement en fer ne paraît donc pas devoir être substitué, avec avantage, au revêtement en fonte.

Montage du revêtement métallique. — Pour des diamètres peu considérables, les segments métalliques ne sont ni de dimensions ni de poids exagéré, et une équipe d'ouvriers peut facilement les manier sans autre secours que de légers échafaudages et d'instruments simples, tels que moufles, palans, etc. Mais, dès que le diamètre s'accroît, il faut recourir à des engins mécaniques permettant de mettre en place les segments rapidement et sans encombrer le souterrain. Déjà Greathead avait projeté un appareil de cette nature, dont malheureusement les dessins sont égarés. La grue de levage de la rivière Saint-Clair, mue à la main, a été décrite au chapitre V. A l'Hudson apparut, pour la première fois, l'idée d'actionner cette grue à l'aide de la force hydraulique déjà employée pour les vérins. Au souterrain de Blackwall, fonctionnaient deux engins analogues pour lever des segments encore plus lourds. Enfin le dernier type a été appliqué au bouclier de station du Waterloo and City Ry. Ces trois appareils sont conçus dans le même esprit et ne diffèrent que par des détails de construction. Il devait forcément en être ainsi ; car, aujourd'hui, les engins mécaniques de cette nature s'exécutent couramment dans d'excellentes conditions et, du moment que le problème était posé, il devait être résolu du premier coup sans tâtonnements.

Mode d'appui des vérins. — Dans tous les ouvrages anglais les tiges des vérins se terminent par de larges patins destinés à répartir la pression sur la grande surface possible. Mais la tête de la tige se trouve forcément en dedans de l'enveloppe, en face des nervures, et il est toujours à craindre que, sous l'effet d'une forte pression, ces nervures viennent à casser ; aussi les vérins sont-ils toujours placés en face des joints horizontaux qui offrent une plus grande résistance.

Les Américains, qui ont avec raison reconnu l'avantage de croiser les joints, se trouvaient, par le fait même de ce mode de construction, privés de ce point d'appui dont la position variait à chaque anneau, tandis que les vérins restaient fixes. Ils ont alors supprimé les patins et recourbé la tête du vérin, de manière à prendre point d'appui contre l'enveloppe elle-même sans toucher aux nervures. Ce dispositif se trouve à la rivière Saint-Clair et à

la rivière de l'Est, qui sont les deux ouvrages réellement américains ; car le bouclier de l'Hudson a été construit par une Compagnie anglaise. Cet artifice n'est pas sans soulever d'objections ; il paraît, en effet, peu rationnel d'appliquer sur une surface aussi limitée des efforts considérables de 40 à 50 t. En outre, la tige des vérins travaille obliquement et peut être faussée, ce qui serait toujours un accident grave. Aussi, malgré ses défauts, le système des larges patins anglais paraît-il encore préférable.

Il faut en tout cas tenir compte dans le tracé des nervures de l'effort qu'elles ont à supporter de la part des vérins pendant l'avancement du bouclier.

Revêtement en maçonnerie. — Le revêtement en maçonnerie de briques avait été appliqué par Brunel ; Beach, en Amérique, l'employait avec ses premiers boucliers. Mais la maçonnerie de briques est lente à construire et coûteuse : aussi fut-elle abandonnée, à la première application du revêtement métallique.

La maçonnerie ordinaire ne présente pas les mêmes inconvénients et, en France en particulier, où cette maçonnerie s'exécute à très bon compte, il était naturel d'essayer de l'employer avec le bouclier. Aux travaux du collecteur de Clichy, hors Paris, M. Chagnaud le premier a appliqué ce principe ; mais il n'a pas cru devoir aller jusqu'au bout, et il s'est servi simplement du bouclier pour construire un boisage métallique, à l'abri duquel il exécutait ultérieurement la maçonnerie. Ce n'est que dans la partie dans Paris que M. Fougerolle a hardiment construit le revêtement en maçonnerie du premier coup à l'abri du bouclier. Si quelques critiques de détail ont pu être formulées, la solution du problème n'en reste pas moins complète et définitive. Cet entrepreneur a pu obtenir une construction rapide et économique.

Mais il n'existe pas partout, comme à Paris, des matériaux permettant de faire de la maçonnerie ordinaire. Est-il possible de lui substituer le béton ? En principe, rien ne paraît devoir s'y opposer, et il semble facile d'exécuter, dans les mêmes conditions, des ouvrages en béton. Il y aurait intérêt à essayer également du béton armé qui nécessite une moindre épaisseur de maçonnerie ; la fouille serait, de ce fait, diminuée, et les vérins, prenant point

d'appui sur les cintres, seraient moins éloignés de l'enveloppe du bouclier et travailleraient dans de meilleures conditions.

Avec la maçonnerie, on doit en effet faire porter les têtes des vérins sur les cintres, assez éloignés de l'enveloppe ; il faut prendre de sérieuses précautions pour éviter que ces cintres ne cèdent ou ne reculent. Les goussets qui rattachent les vérins à l'enveloppe sont beaucoup plus longs et pour un même effort développé le bras de levier, au bout duquel agit cet effort, étant beaucoup plus considérable, les boulons d'attache sont plus exposés à être arrachés en déchirant l'enveloppe ou les goussets.

Aussi certains inventeurs ont-ils pensé à prendre un point d'appui sur la maçonnerie même. Ils ont proposé, à cet effet, de l'exécuter avec des blocs de béton comprimé, ou pierres artificielles, réunis avec des joints minces garnis de mortier de ciment et de sable fin. Ils pensaient y trouver à ce point de vue de grands avantages ; mais, pour avoir une bonne liaison des maçonneries, ils seraient obligés de disposer ces blocs en harpes avec des arrachements, et on ne voit pas bien comment les vérins répartiraient la pression sur cette surface irrégulière. N'y a-t-il pas à craindre aussi que les joints ne se serrent inégalement et que le bouclier ne dévie de la ligne droite? Enfin, pour obtenir une surface intérieure bien régulière, malgré les variations du bouclier, ne fussent-elles que de quelques centimètres, il faudra laisser un jeu assez fort entre la maçonnerie et la queue du bouclier, et pendant la marche bourrer ce vide avec du béton. Il y a donc encore bien des points délicats à élucider et, avant d'émettre une opinion ferme, il convient d'attendre que la pratique se soit prononcée.

L'expérience, au contraire, donne le droit de dire que l'exécution d'un souterrain en maçonnerie ordinaire par la méthode du bouclier est possible ; il sera établi plus tard qu'elle offre de grands avantages sur les procédés en usage pour la rapidité et l'économie.

Le mode d'exécution de la maçonnerie et la manœuvre des vérins ont été longuement expliqués et commentés dans les chapitres XII et XIII au sujet des travaux du collecteur de Clichy.

Comparaison entre le revêtement métallique et le revêtement en maçonnerie. *Dépenses.* — Le revêtement en maçonnerie

a été longtemps écarté pour bien des motifs et, surtout, parce qu'en raison de son épaisseur il nécessitait une fouille beaucoup plus large que le revêtement en fonte, ce qui augmentait sans profit la dépense. Il faut ici, comme pour la fonte, distinguer les cas des terrains résistants et celui des terrains meubles.

Dans le premier cas la comparaison sera au moins certainement entachée d'erreur en faveur de la fonte en évaluant à 100 fr. le mètre cube de maçonnerie, y compris la fouille nécessaire, et à 200 fr. le prix de la tonne de fonte mise en place. Le tableau ci-après donne, pour différents diamètres, la comparaison des dépenses :

COMPARAISON DES PRIX DANS LES TERRAINS RÉSISTANTS

DIAMÈTRE	MAÇONNERIE			FONTE		RAPPORT des dépenses.
	Épaisseur moyenne.	Volume.	Dépense.	Poids 1/4 d^2	Dépense.	
Mètres.	Mètres.	M. cubes.	Francs.	Tonnes.	Francs.	
2	0,30	1,88	188	1	200	0,94
3	0,35	3,29	329	2,25	450	0,73
4	0,40	5,02	502	4	800	0,63
5	0,45	7,07	707	6,25	1 350	0,53
6	0,50	9,42	942	9	1 800	0,52
7	0,55	13,00	1 300	12,25	2 450	0,50
8	0,60	15,08	1 508	16	3 200	0,47
9	0,65	18,38	1 838	20,25	4 050	0,45
10	0,70	21,80	2 180	25	5 000	0,43

Les prix de maçonnerie sont forts ; car le collecteur de Clichy, tout entier, de 6 m. de diamètre intérieur a à peine coûté le prix donné ici pour le revêtement seul. Cependant l'avantage en faveur de la maçonnerie est très net.

Dans le second cas, il faut porter le poids de fonte à 1/3 d^2, augmenter l'épaisseur, et le prix de la maçonnerie à 150 fr. par mètre cube pour tenir compte de l'emploi de l'air comprimé.

Dans cette hypothèse, la maçonnerie ne devient avantageuse qu'avec les grands diamètres ; il n'y a en tout cas aucune exagération à conclure que la maçonnerie ne doit pas être écartée *a priori* et que la comparaison doit être faite avec un grand soin dans chaque cas particulier.

Rapidité d'exécution. — Aux travaux du collecteur de Clichy

intra muros le revêtement en maçonnerie a pu être exécutée très rapidement et, en ajoutant un transporteur pour l'évacuation des déblais, les deux chantiers ne se gênaient en rien. A cet égard les deux modes de revêtements sont certainement équivalents.

COMPARAISON DES PRIX DANS LES TERRAINS MEUBLES

DIAMÈTRE	MAÇONNERIE			FONTE		RAPPORT des dépenses.
	Épaisseur moyenne.	Volume.	Dépenses	Poids 1/3 d^2.	Dépense.	
Mètres.	Mètres.	M. cubes.	Francs.	Tonnes.	Francs.	
2	0,40	2,51	426	1,3	260	1,6
3	0,475	4,48	672	3	600	1,1
4	0,55	6,91	1 036	5,3	1 060	0,97
5	0,625	9,82	1 473	8,3	1 660	0,88
6	0,70	13,20	1 980	12	2 400	0,82
7	0,775	17,04	2 556	16,3	3 260	0,79
8	0,85	21,36	3 196	21,3	4 260	0,75
9	0,925	26,15	3 922	27	5 400	0,73
10	1,00	31,14	4 671	33	6 600	0,71

On pourrait même ajouter qu'en renonçant à la forme circulaire, ce qui serait très rationnel, la maçonnerie s'exécutera bien plus facilement que le revêtement métallique. Ce dernier devrait en effet se composer d'un grand nombre de pièces de formes différentes dont l'approvisionnement et l'emploi donneraient lieu à bien des sujétions.

Résistance. — Les épaisseurs indiquées pour la maçonnerie dans les tableaux ci-dessus permettent d'assurer toute la résistance nécessaire. On a exprimé la crainte que les voûtes en maçonnerie provoquent un tassement par suite de l'abaissement qui suit généralement le décintrement. Mais avec une construction soignée ce tassement se réduit, surtout pour d'aussi faibles portées, à quelques millimètres ; d'ailleurs les revêtements en fonte donnent lieu également à des tassements qui déterminent dans les nervures des efforts anormaux et dangereux. Aucun des deux systèmes n'a donc de supériorité à ce point de vue.

Étanchéité. — Il a été dit que le revêtement métallique, sous les grandes pressions d'eau, permettait seul d'obtenir une étanchéité

absolue, qu'il est, au contraire, à peu près impossible ou tout au moins très difficile d'obtenir dans les voûtes en maçonnerie, même avec les chapes les mieux faites avec soin et à l'air libre. Il y a beaucoup de vrai dans cette affirmation. Cependant il ne faut pas perdre de vue que le revêtement métallique n'est pas absolument étanche par lui-même et qu'il n'acquière cette qualité qu'après l'injection du mortier entre le revêtement et le terrain. Et, encore, faut-il y apporter un soin tout spécial pour éviter les suintements par les joints. Aux siphons de la Concorde et de Clichy, tout le monde a pu observer, après l'achèvement du travail, des suintements très appréciables.

D'autre part, les essais faits au collecteur de Clichy ont montré que l'injection pouvait être appliquée aux voûtes en maçonnerie et qu'elle assurait un remplissage parfait de la maçonnerie et des vides qui l'entouraient, ainsi qu'une étanchéité absolue.

Ce n'est donc pas au revêtement en lui-même, mais à une bonne exécution de l'injection qu'il faut demander l'étanchéité.

Effet des vérins. — Le revêtement métallique offre immédiatement aux vérins un point d'appui inébranlable pour l'avancement du bouclier. La maçonnerie ordinaire, même au mortier de ciment, ne peut offrir les mêmes ressources. A moins d'attendre longtemps et de ralentir la marche du travail d'une manière inadmissible, on ne peut reculer l'avancement jusqu'au moment où elle fait sa prise complète. Même dans ce cas, il faudrait craindre des écrasements. Il n'en est pas de même avec les maçonneries de pierre de taille ou de blocs artificiels en béton offrant des joints minces et bien réguliers. Il serait possible de répartir la pression des vérins directement sur ces maçonneries par de larges patins ou une poutre mobile. La surface d'appui, par mètre courant de développement de voûte, serait alors soit de la moitié de la surface de la section transversale de la voûte si on tient compte de la découpe des joints, soit de la surface entière si on dispose les patins de manière à appuyer sur les deux rangées en saillie et en retraite. Les efforts se calculent en supposant le bouclier de longueur égale au diamètre, et, en admettant 5 t. par mètre carré de surface de frottement dans les terrains faciles et 20 t. dans les terrains difficiles. Le

tableau ci-après donne dans ces diverses hypothèses la pression à supporter par centimètre carré :

PRESSION EXERCÉE PAR LES VÉRINS SUR UN REVÊTEMENT EN MAÇONNERIE

DIAMÈTRE	TERRAINS FACILES			TERRAINS DIFFICILES		
	Surface d'appui en centimètres carrés.	Effort en tonnes.	Pression par centimètre carré en kilogrammes.	Surface d'appui en centimètres carrés.	Effort en tonnes.	Pression par centimètre carré en kilogrammes.
Mètres.						
2	3 000	10	de 3, à 6	4 000	40	de 10 à 20
3	3 500	15	— 4,3 à 8,6	4 750	60	— 12,6 à 25,2
4	4 000	20	— 5, à 10	5 500	80	— 14,6 à 29,2
5	4 500	25	— 5,5 à 11	6 250	100	— 16 à 32
6	5 000	30	— 6, à 12	7 000	120	— 17,1 à 34,2
7	5 500	35	— 6,4 à 12,8	7 750	140	— 18 à 36
8	6 000	40	— 6,6 à 13,2	8 500	160	— 18,8 à 37,6
9	6 500	45	— 6,9 à 13,8	9 250	180	— 19,5 à 39
10	7 000	50	— 7,1 à 14,2	10 000	200	— 20 à 40

Ces efforts ne dépassent pas, en général, ceux auxquels on peut soumettre les maçonneries de voûtes appareillées. Cependant, dans les terrains difficiles, quoique l'effort de 20 t. soit élevé; que la longueur du bouclier et par suite la surface du frottement, aient été exagérées en la supposant égale au diamètre, il faut tenir compte d'autre part qu'à certains moments une partie seulement des vérins fonctionne et que, de ce fait, la pression pourrait atteindre des valeurs dangereuses. Ce mode d'appui ne peut donc être appliqué qu'avec une grande prudence, dans des terrains relativement faciles et avec des diamètres modérés.

Autrement, il faudrait craindre, comme avec la maçonnerie fraîche, des dislocations qui compromettraient la solidité de l'ouvrage et rendraient impossible la direction du bouclier.

Il faudra probablement souvent mieux accepter l'artifice adopté au collecteur de Clichy et prendre point d'appui sur les cintres servant à la construction de la maçonnerie, en employant de larges patins pour bien répartir la pression.

Avancement de la queue du bouclier. — Avec le revêtement en fonte, le dégagement de la queue du bouclier se fait sur une surface lisse sans difficulté, et, à condition de bien remplir le vide

qui en résulte par l'injection de mortier, il n'y a à craindre ni dislocations du revêtement ni tassements du terrain.

Avec la maçonnerie, l'essai n'a encore été fait que pour la voûte ; l'expérience a prouvé, d'une part qu'il n'y avait à craindre aucune dislocation de la maçonnerie, et que l'injection pouvait se faire et éviter tout tassement. Quant à la partie basse, au collecteur de Clichy, la nature du sol avait permis de la construire sur le terrain même et par suite de supprimer la queue au-dessous des naissances. Avec un terrain très mauvais ou dans l'air comprimé, il ne serait pas toujours possible de laisser à nu une aussi grande surface de sol. Il ne faut pas cependant songer à maçonner le radier sur les tôles de la queue du bouclier. Ces maçonneries fraîches pèseraient de tout leur poids sur les tôles auxquelles elles adhèreraient ; elles seraient par suite entraînées et disloquées. En outre, au fur et à mesure qu'elles échapperaient à la queue, avec quelque rapidité que fût faite l'injection, les maçonneries ne pourraient rester suspendues au-dessus du petit vide laissé par les tôles de la queue et elles auraient une tendance à tasser, ce qui entraînerait de graves désordres.

Comment remédier à cet inconvénient ? Il est certain que, si le besoin s'en faisait sentir, on ne tarderait pas à trouver un dispositif permettant d'y obvier. Il serait possible, par exemple, de mettre sous la maçonnerie une enveloppe en tôle mince qui éviterait son entraînement et suffirait à la maintenir pendant l'exécution de l'injection. Brunel, auquel il faut toujours revenir, avait eu à lutter contre une difficulté analogue, et il en avait triomphé en employant un blindage en bois sur lequel s'appuyaient les jambes du bouclier, et qui était maintenu par elles jusqu'à ce que la maçonnerie fût exécutée. Quoi qu'il en soit, il paraît prudent de n'émettre une opinion ferme que lorsque l'expérience aura prononcé.

Etanchéité à l'air comprimé. — L'air comprimé peut être employé de deux façons, soit dans une grande chambre de travail comprenant le bouclier et une partie du souterrain, soit en avant de la cloison du bouclier sur tout ou partie de sa hauteur,

Dans le premier cas, surtout avec de fortes pressions de 2 à 3 kg., le revêtement en maçonnerie présente une certaine infério-

rité. L'exemple du souterrain d'Emmesberg, en Suisse, et surtout celui de l'Hudson montre qu'il est très difficile d'obtenir de grandes surfaces de maçonnerie étanches à l'air. L'emploi judicieux de l'injection de mortier diminuerait certainement les pertes dans le souterrain même ; mais il serait hardi d'affirmer qu'il les supprimerait. En tout cas, il serait difficile d'avoir un joint étanche entre la queue du bouclier et la maçonnerie. Il faut apporter des soins tout spéciaux, même avec le revêtement métallique, pour bourrer ce joint et, ainsi qu'il sera dit ci-après, bien des procédés ont été tentés, soit des lames flexibles, comme à la rivière Saint-Clair et à la rivière de l'Est, soit un bourrage d'argile, comme au Blackwall. Avec la maçonnerie qui ne peut être soumise à un frottement énergique, sous peine d'être arrachée et disloquée, le problème serait encore plus difficile.

Le second cas se présente seulement lorsque l'air comprimé n'est nécessaire que sur une partie seulement de la hauteur du souterrain. Les pressions seront par suite beaucoup plus faibles; les rentrées d'eau, qui pourraient se produire à l'arrière du bouclier, peu abondantes, et il est facile d'imaginer un système quelconque pour les éviter. Le problème se lie d'ailleurs à celui examiné ci-dessus, pour la construction de la partie basse à l'intérieur de la queue du bouclier; il paraît pouvoir être résolu par les mêmes procédés.

Résumé. — En résumé, le revêtement en maçonnerie est certainement économique dans les terrains où il n'est pas fait emploi de l'air comprimé. Il peut offrir les mêmes qualités de rapidité d'éxécution, de résistance et d'étanchéité que le revêtement métallique, et il se prête à l'application de la méthode du bouclier sans difficulté. Il faut reconnaître au contraire que, avec de fortes pressions d'air comprimé, il se présenterait de sérieuses difficultés et que le revêtement métallique serait d'une exécution plus aisée et plus sûre.

CHAPITRE XVII

CONDITIONS GÉNÉRALES D'EMPLOI DE LA MÉTHODE

Direction. — Donner avec exactitude et régularité au bouclier la direction qui a été choisie est une des conditions essentielles de son emploi. Cette constante préoccupation de la direction existait déjà avec les autres procédés d'exécution d'un souterrain, mais elle était loin d'atteindre le même degré. On n'avait besoin de précision que pour l'exécution des maçonneries faites à l'arrière à l'abri des boisages avec toutes facilités pour vérifier et rectifier une erreur; les mineurs et les terrassiers se contentaient de points grossièrement donnés pour implanter leur galerie d'attaque. Avec le bouclier il en est tout autrement; l'implantation définitive du revêtement, monté dans le bouclier même, est commandée sans rectification possible par la position de l'appareil.

Le bouclier doit donc tout à la fois être construit de manière à permettre de rectifier rapidement toute erreur commise en plan et en profil et, en outre, être dirigé avec le plus grand soin.

Pour pouvoir rectifier la direction du bouclier, il faut que les vérins, qui servent à le faire avancer, puissent être manœuvrés indépendamment les uns des autres. Mais cette manœuvre doit toujours être faite progressivement et sans brutalité; car, l'arrêt de quelques presses a pour effet de développer dans les autres des efforts anormaux. S'ils n'étaient pas limités, ils pourraient rapidement devenir dangereux pour le bouclier qu'ils disloqueraient et pour le revêtement qui pourrait céder ou se briser. Pour éviter des accidents de cette nature, il y a tout avantage à multiplier les vérins et à les faire plus faibles; ce qui permet de réduire la puissance à demander à chacun d'eux et d'obtenir une précision beaucoup plus grande.

Cette manœuvre doit surtout être confiée à un chef soigneux et habile, sous peine de s'exposer, au détriment de l'outil et de l'ouvrage, à voir le bouclier osciller perpétuellement autour de sa direction. On peut affirmer, par l'expérience acquise dans de nombreux travaux, que le bouclier peut être dirigé avec précision, quelle que soit la nature du terrain; les craintes exprimées à cet égard par M. Chesborough et les ingénieurs américains ne peuvent être attribuées qu'au défaut d'attention apportée au début à ce côté important de la question.

Il ne suffit pas de demander une bonne direction du bouclier, il faut donner à ceux qui en sont chargés des indications et des bases précises. Pour cela il est nécessaire de répéter les opérations de précision servant à fixer l'alignement et le nivellement, d'autant plus fréquemment que l'avancement est plus rapide. Dans divers chapitres, on a intentionnellement insisté sur la manière dont ces opérations avaient été conduites. Dans tous les grands travaux, il y avait un ingénieur spécialement chargé de ce soin et dont c'était l'unique occupation. C'est dire qu'il a paru indispensable de ne reculer devant aucune dépense pour assurer la bonne exécution du travail. On ne saurait, en effet, y attacher trop d'importance et ce serait se préparer de graves déboires que de vouloir marcher trop vite sans faire les vérifications nécessaires, et d'abandonner la direction du bouclier entre les mains du premier venu.

Évacuation des déblais. — L'avancement du bouclier ne prend que fort peu de temps et l'exécution du revêtement en arrière peut être menée aussi vite qu'il est nécessaire; on peut donc dire que c'est la fouille qui règle la rapidité de l'avancement.

Le chantier doit donc être organisé, de manière à ce que rien ne vienne entraver ou retarder cette fouille. L'emploi d'une fouille blindée en avant du bouclier a déjà été condamné pour des motifs de sécurité; il serait aussi regrettable au point de vue de la célérité. L'un des grands avantages du bouclier n'est-il pas, en effet, de permettre aux ouvriers de consacrer tout leur temps à la fouille, au lieu d'en perdre une grande partie à poser un boisage souvent compliqué?

Mais ce n'est pas tout que de fouiller; il faut, en outre, éva-

cuer rapidement les déblais. Dans les méthodes ordinaires, le souterrain ne s'attaque jamais sur toute sa hauteur ni toute sa largeur; divers ateliers, placés les uns derrière les autres, effectuent la fouille par portions successives : cet échelonnement rend très difficile et très lente l'évacuation des déblais déjà gênée par l'embarras des étais. Avec le bouclier, l'attaque se fait simultanément sur toute la surface et, quand elle est divisée en divers étages, les ateliers sont superposés les uns aux autres, et évacuent leurs déblais, à l'arrière du bouclier, dans un même plan sans se gêner; ces déblais viennent tomber dans des wagons qui les évacuent immédiatement.

Néanmoins le stationnement de ces wagons, leur chargement et leur passage peuvent gêner le montage du revêtement dans la queue du bouclier. Cette cause de retard était peu sensible avec l'emploi du revêtement métallique qui se faisait plus vite que la fouille. Mais, avec un revêtement en maçonnerie, qui se monte plus lentement et dont l'exécution occupe presque tout le temps qui s'écoule entre deux avancements, il y aurait eu là une sérieuse cause de retard et une gêne considérable. C'est pour y remédier que les deux boucliers du collecteur de Clichy ont été complétés par des transporteurs de déblai. La description de ces deux ouvrages a montré l'avantage énorme qui en résultait et notamment pour la partie intra muros comment les deux chantiers de terrassement et de maçonnerie, quoique accolés l'un à l'autre, conservaient leur pleine indépendance.

Le transport des déblais dans le souterrain peut se faire rapidement, puisque le revêtement immédiatement terminé permet de disposer de la galerie, sans qu'aucun étai ni aucune entrave, de quelque sorte que ce soit, arrêtent les convois de déblais. Dans le travail à l'air comprimé il faut à ce point de vue donner aux sas à air une capacité suffisante, pour permettre le passage rapide des wagons qui arrivent de l'avancement.

Exécution des terrassements. — Quand le terrain dans lequel on opère est assez mauvais pour que, même avec l'emploi de l'air comprimé, les ouvriers ne puissent pénétrer au delà de la cloison du bouclier, l'exécution des terrassements est livrée au hasard de

l'écoulement des terres par les ouvertures ménagées soit dans la cloison, soit dans le blindage du front d'attaque. Il est bien certain que le déblai s'étend au delà du vide du souterrain et, dans ces circonstances, son exécution provoque toujours des tassements importants et des mouvements du terrain. Il faut se borner, et c'est précisément le but du bouclier, à limiter ces mouvements et à faire en sorte qu'ils ne puissent devenir une source de danger.

Quand, au contraire, les ouvriers peuvent pénétrer jusqu'au front de taille, avec un travail bien dirigé ils peuvent conduire la fouille sans provoquer de mouvements dans les terres. On devra distinguer cependant les terrains fermes qui se tiennent par eux-mêmes comme l'argile, et les terrains ébouleux comme les sables.

Dans les terrains fermes, les entrepreneurs sont souvent portés à travailler en avant du couteau et à préparer la place du bouclier sur la longueur d'une course. Il faut cependant se garder d'abuser de la sécurité trompeuse qu'offre un terrain de cette nature. Il vaut mieux fractionner la course que de s'aventurer trop loin et, en tous cas, il est toujours indispensable de donner beaucoup de gras à la fouille et de laisser au couteau le soin de la dresser. Ce travail demande à être fait par des mineurs assez expérimentés pour ne pas se laisser surprendre par un changement brusque de terrain ou par des éboulements dus à des plans de glissement ou à toute autre cause.

Avec les terrains ébouleux le désir d'aller vite conduit parfois à des pratiques dangereuses ; afin de pouvoir procéder par abatage, le front de taille est souvent raidi outre mesure, au risque de provoquer des éboulements, qui peuvent causer des accidents et surtout amener des tassements à la surface. Dans un terrrain de cette nature, le couteau devrait être toujours engagé dans le sol vierge et les terres découpées suivant un talus assez doux pour éviter toute surprise. Dans le travail à l'air comprimé, il est impossible de donner au front de taille un développement aussi grand, sans s'exposer à perdre des quantités d'air considérables ; il faut alors le protéger par un blindage et, comme on l'a vu, le type de souterrain de Blackwall paraît présenter à cet égard toutes les qualités de simplicité et de sécurité que l'on peut souhaiter.

Tassements. — Quelque soin qu'il soit apporté à l'exécution des terrassements, il existe toujours des vides autour du bouclier ; dans les terrains fermes, ce sont des arrachements ; dans les terrains ébouleux, de petites excavations produites par le couteau lui-même en dressant la fouille. En outre le bouclier, par sa masse, tend à refouler la terre devant lui en provoquant des vides à l'arrière.

A ces vides, dus au travail même de la fouille, viennent s'ajouter le vide laissé par le dégagement de la queue du bouclier et le tassement provenant de la flexion du revêtement. En général il s'agit, en tout cas, d'un vide total de quelques centimètres qui n'aurait aucune importance si le souterrain s'exécutait à une grande profondeur ou en rase campagne. Ce vide, en effet, ne provoquerait guère de tassements plus appréciables que ceux causés par les bourrages à pierres sèches ou les bois abandonnés, dans les méthodes anciennes. Mais si le travail est fait dans une ville, à proximité des immeubles et à faible profondeur, il est impossible de tolérer les désordres qui seraient la conséquence de tassements même aussi faibles.

L'injection de mortier doit alors intervenir, non plus seulement pour assurer l'étanchéité, mais aussi pour obtenir un bourrage immédiat et parfait. Au mortier de ciment on peut avec avantage substituer, dans ce cas, le mortier de chaux. Quant à la proportion de sable, elle se règle suivant le travail. Au début de l'opération, quand les vides sont encore larges et que l'injection pénètre plus aisément, le dosage en sable peut être forcé. A la fin, au contraire, pour pénétrer dans les derniers interstices, il faut un mortier très liquide et riche en chaux. Les ouvriers en sont immédiatement avertis par les obstructions qui se produisent dans le tube qui va de l'appareil à la lance. Il n'y a pas lieu d'ailleurs de forcer la pression. Avec 3 kilogrammes par centimètre carré l'injection pénètre fort loin dans les moindres cavités, étant bien entendu que ces 3 kilogrammes sont comptés en sus de la charge hydrostatique qui pourrait exister dans le souterrain.

Il ne faut pas exécuter l'injection quelques jours après l'exécution du revêtement, comme l'entrepreneur est souvent tenté de le faire pour simplifier la main d'œuvre en injectant de grandes longueurs

à la fois. Elle doit suivre pas à pas l'avancement du bouclier, en prenant des dispositions analogues à celles indiquées aux travaux de la station de la Cité du Waterloo and City Ry.

En opérant ainsi, dans les terrains qui se tiennent, toutes les cavités seront remplies avant qu'elles ne se propagent par éboulements. Dans les terrains coulants comme le sable, l'injection pénètrera dans les pores du terrain, tout autour de l'ouvrage, et lui rendra une densité suffisante pour qu'il ne puisse plus tasser sous la charge des terrains supérieurs ou de la circulation à la surface.

L'injection s'applique d'ailleurs, comme on l'a vu, aussi bien avec la maçonnerie qu'avec le revêtement métallique.

Profondeur de l'ouvrage. — Bien des éléments interviennent dans la détermination de la profondeur à laquelle peut être exécuté un souterrain.

Le mérite de la méthode du bouclier est d'avoir amélioré une condition qui était souvent une grave cause de gêne.

Quand il s'agissait de passer sous une rivière, la crainte des invasions d'eau conduisait à s'enfoncer profondément, si profondément qu'il fallait employer l'air comprimé à des pressions inacceptables. L'exemple du souterrain de Blackwall, exécuté à environ 1,70 m. au-dessous du fond de la rivière, a montré que l'on pouvait aborder des travaux réputés jusque-là impossibles. Cependant c'est là une limite extrême, qui peut être acceptée par nécessité, mais qu'il est sage d'éviter. Une couche de terre de 3 m., entre le dessus de l'ouvrage et l'eau paraît être le minimum que l'on doit chercher à conserver. Il ne faut admettre une épaisseur moindre que lorsque la charge hydrostatique, au bas de la galerie, viendrait à dépasser 2 à 3 kilogs, pression au-dessus de laquelle le travail à l'air comprimé devient dangereux.

Dans une ville, sous les rues, les conditions sont tout autres et le bouclier permet d'exécuter les souterrains les plus larges à fleur de sol. Le collecteur de Clichy hors Paris a été construit à 0,43 m. de profondeur, en réservant tout juste le pavage et sa fondation, sans accident, presque sans incident, malgré une circulation lourde et intense. Les petits mouvements qui se sont produits dans le pavage auraient été totalement évités, si on avait procédé à l'in-

jection immédiate. Dans cet exemple la dernière limite possible a été atteinte et la démonstration est complète.

Sas à air. — L'emploi de l'air comprimé dans un souterrain présente des difficultés beaucoup plus grandes que pour le fonçage d'un puits, en raison de la différence des pressions nécessaires en haut et en bas de la galerie. Il y a toujours lieu de craindre les pertes violentes d'air dans le haut suivies d'irruption d'eau ou les inondations par le pied. Une pression trop forte pourrait faire sauter la mince couche de terre qui protège l'ouvrage

On a vu à propos du bouclier les précautions qu'il était nécessaire de prendre pour assurer une rapide fermeture de la cloison, les écrans ou trappes disposés, soit sur les plates-formes de travail au souterrain de Blackwall, soit en arrière de la cloison au souterrain sous la Mersey à Liverpool, de manière à limiter la hauteur de l'eau et à permettre aux ouvriers de disposer d'une cloche d'air où ils puissent respirer. Ce n'est pas tout, il faut encore leur assurer les moyens de s'échapper. Au souterrain sous l'Hudson, à Melbourne, les ouvriers ont péri parce que l'unique issue, le sas à air, s'est trouvé fermé et n'a pu être ouvert avant que l'eau ait complètement envahi la galerie. Ces accidents ont montré la nécessité, dans tous les travaux difficiles, d'avoir double sas, dont l'un, considéré comme sas de sûreté, reste toujours ouvert du côté de l'avancement, et doit être assez grand pour offrir un refuge à tous les ouvriers.

Quand la galerie est trop étroite pour pouvoir accoler ainsi deux sas l'un à côté de l'autre, il est encore possible, comme au souterrain sous la Mersey, de les mettre à la suite l'un de l'autre.

Enfin avec les très fortes sections, comme au souterrain de Blackwall où les pertes d'air et les rentrées d'eau par le joint, entre la queue du bouclier et le revêtement, peuvent devenir une source de danger, le souterrain n'est plus protégé contre l'inondation par la cloison ni aucun des dispositifs imaginés dans le bouclier ; il devient alors indispensable de maintenir à une faible distance en arrière un écran de sûreté descendant de la voûte aussi bas que le permettent les besoins de la circulation.

La construction des sas à air est à peu près la même dans tous

les ouvrages : ils ont environ 1,50 m. de largeur sur 1,80 m. de hauteur. A côté de la tuyauterie nécessaire à la manœuvre du sas, sont insérés dans la cloison étanche des tuyaux en assez grand nombre ; les principaux sont : le tuyau d'air comprimé pour l'avancement, le tuyau d'air comprimé à haute pression pour l'injection, le tuyau muni de robinets pour évacuation de l'eau de la chambre de travail, le tuyau d'alimentation d'eau pour l'injection, le tuyau d'eau sous pression pour les vérins, le tuyau contenant les fils d'éclairage et téléphoniques, un gros tuyau formant écluse pour le passage des rails et autres objets trop longs pour passer par le sas à air, un tuyau muni de robinets et de verres pour les visées, etc. Cette tuyauterie est, comme on le voit, fort compliquée et fort encombrante.

Avec les faibles sections le sas peut être construit dans l'épaisseur d'un massif en maçonnerie, qu'il faut rendre bien étanche en employant au besoin des injections de ciment dans des rainures ménagées à l'avance. Avec les grandes sections, le massif de maçonnerie deviendrait trop onéreux et il est plus économique de se contenter d'une simple cloison en maçonnerie, réduite à l'épaisseur nécessaire pour résister à la pression et d'y insérer un sas métallique. Dans certains cas, la cloison elle-même a été faite en métal ; mais, avec les nombreux trous qu'il faut y ménager pour le passage des tuyaux, il est très difficile d'obtenir une étanchéité complète ; en outre, ces cloisons comportent généralement des pièces de grandes dimensions, et, quand il est nécessaire, par suite de l'allongement du souterrain de reconstruire l'écluse plus près du front de taille, il y a de grosses difficultés à leur faire traverser le sas à air, tandis que rien n'est plus facile que de faire passer les petits matériaux nécessaires pour la construction d'un sas ménagé dans une cloison en briques.

Avec une grande hauteur, un dernier sas peut être installé, tout en haut de la cloison, pour offrir une issue aux ouvriers, dans le cas où l'inondation serait tellement rapide qu'ils ne puissent arriver aux sas du bas avant qu'ils soient noyés. C'est ce qui a été fait au souterrain de Blackwall.

Il faut, bien entendu, dans les terrains dangereux éviter d'exécuter le souterrain en montant ; car dans ce cas une faible hau-

teur d'eau, à l'avancement, suffirait à bloquer les sas, et les ouvriers n'auraient plus la possibilité de se sauver. Si le profil ne permet pas d'avoir une pente unique, la prudence commande donc d'avoir deux attaques partant de chaque rive et se réunissant au point bas.

Joint du bouclier et du revêtement. — Le jeu laissé entre la queue du bouclier et le revêtement est une cause de perte d'air et de danger. A la rivière Saint-Clair, les Américains ont essayé d'y obvier à l'aide d'une rondelle en caoutchouc ; mais elle s'échappait toujours de la rainure où elle était maintenue par des vis, et il a fallu lui substituer une rondelle en acier flexible, dont on ne connaît pas très bien les résultats. A la rivière de l'Est, ils avaient attaché à la queue du bouclier une lame de caoutchouc ; mais si l'on comprend que la pression de la terre et de l'eau pouvaient l'appliquer contre le revêtement et empêcher l'invasion par la boue, il est évident que cette lame ne pouvait s'opposer à l'échappement de l'air comprimé, qui tendait à la soulever. D'ailleurs, dans ce travail le bouclier n'a eu à effectuer que de très courts trajets. Il ne semble donc pas qu'il y ait jusqu'à présent grand'chose à espérer des dispositifs insérés entre la queue du bouclier et le revêtement ; ils sont évidemment exposés à trop de causes de destruction.

Au souterrain de Blackwall où la question avait une grande importance, il y avait toujours quelques hommes constamment occupés à garnir ce joint avec de l'argile, procédé simple, mais un peu primitif, certainement coûteux et peut-être insuffisant.

L'idée indiquée sur le dessin du bouclier construit pour la station de la Cité, du Waterloo and City Ry, paraît fort juste : elle consiste à placer la rondelle formant joint, non plus entre les deux surfaces frottantes, mais en dehors en face du vide correspondant au jeu et à profiter de l'appui des vérins pour l'appliquer énergiquement. Il faut, il est vrai, l'enlever pour prolonger le revêtement, mais elle peut être fractionnée en autant de sections qu'il y a de vérins ; en outre, cet enlèvement se fait au moment où le bouclier est au repos, après l'exécution de l'injection, c'est-à-dire dans des conditions d'autant moins dangereuses que les ouvriers qui procèdent à cet enlèvement et au montage de l'enveloppe sont

à même d'étancher avec de la glaise la moindre fuite qui viendrait à se déclarer.

Parcours des boucliers. — Le tableau ci-après donne le parcours fait par les boucliers dans la plupart des ouvrages cités :

Siphon de la Concorde .	240 m.	Waterloo and City Ry . (moyenne)	800 m.
Souterrain de la Tour de Londres	410 —	Souterrain de Blackton.	130 —
Siphon de Clichy	470 —	Souterrain du port de Glasgow	215 —
Souterrain de Kingston .	165 —	Souterrain d'Edimbourg	230 —
Souterrain sous la Mersey	245 —	Souterrain sous l'Hudson.	550 —
Souterrain sous la rivière de l'Est	50 —	Souterrain sous la rivière Saint-Clair (moyenne).	915 —
City and South London Ry (moyenne)	400 —	Souterrain de Blackwall.	940 —
Glasgow District Subway (moyenne)	250 —	Collecteur Clichy *extra muros*	1250 —

Il montre qu'en général dans les travaux de diamètre moyen les plus grands parcours varient de 500 à 800 m. Exceptionnellement, au souterrain de la rivière Sainte-Claire et au souterrain de Blakwall, on a dépassé 900 m.

En multipliant les boucliers et les attaques, comme cela a été fait aux chemins de fer électriques du City and South London Ry et du Waterloo and City Ry, on augmente la vitesse d'exécution ; mais la dépense par mètre courant s'accroît puisqu'il faut amortir les frais de construction de chaque bouclier sur une bien moins grande longueur. Avec des boucliers pesant 6 t. en moyenne, il n'y a pas grand inconvénient ; mais les grands boucliers pèsent 60 à 100 t. et coûtent, à 1 000 fr. la tonne, 60 à 100 000 fr. : le prix de revient varie donc considérablement avec le parcours. Sur 1 000 m. la part d'amortissement du bouclier est de 60 à 100 fr. par mètre courant ; si, au contraire, un bouclier peut parcourir, comme on espère le faire au collecteur de Clichy, une longueur de 2 500 m., les frais par mètre courant relatifs au bouclier ne sont plus que de 12 à 25 fr., ce qui constitue une différence considérable.

Vitesse d'avancement. — On a pu recueillir les vitesses maxima

et moyennes d'un certain nombre des travaux qui viennent d'être décrits. Elles sont résumées dans le tableau ci-après :

VITESSES D'AVANCEMENT PAR JOUR

DÉSIGNATION DES OUVRAGES	VITESSE	
	Maxima.	Moyenne.
Siphon de la Concorde	3,00	2,15
Tour de Londres	2,74	2,58
Siphon de Clichy	2,50	1,80
Mersey	2,10	1,50
Rivière de l'Est	»	1,22
City and South London Ry	4,88	3,52
Glasgow district subway	»	1,00
Waterloo and City Ry	»	3,05
Glasgow harbour	0,90	0,60
Hudson	3,04	1,50
Rivière Saint-Clair	4,67	2,32
Blackwall	3,81	2,50
Collecteur Clichy, extra muros	9,10	5,45
Id. intra muros	6,00	3,20

Il est intéressant de remarquer combien l'exécution des boisages en avant du bouclier a retardé l'avancement aux deux souterrains de Glasgow.

En mauvais sol, comme à la Mersey, à la rivière de l'Est, à l'Hudson, les avancements moyens sont d'environ 1,50 m. Cependant, à la rivière Saint-Clair et au Blackwall, avec des boucliers très bien compris et un travail habilement dirigé, la moyenne s'est élevée à 2,50 m.

Dans les terrains plus maniables, la vitesse a été d'autant plus grande que l'on a eu moins besoin de recourir à l'air comprimé : elle varie de 2 à 3 m. par jour.

Enfin, sans air comprimé, comme au City and South London, au Waterloo and City et au collecteur Clichy, la moyenne varie de 3 à 5 m.

Il y a peu de chose à dire des maxima qui sont peu comparables; pour les uns, il s'agit du maximum fait dans une journée; pour les autres, ce maximum journalier est déduit de la plus forte

semaine ou du mois le plus fort et doit par conséquent être moins élevé.

Quoi qu'il en soit, la méthode du bouclier permet de compter sur un avancement moyen d'environ 1,50 m. en très mauvais sol sous une rivière, à l'air comprimé, de 2,50 m. dans un terrain maniable à l'air comprimé et enfin de 3,50 m. à l'air libre, dans un terrain moyen, ce dernier chiffre tombant à 3 m. quand on rencontre beaucoup de roches à la mine.

Ces chiffres sont en tout cas bien supérieurs aux avancements ordinaires en souterrain qui varient de 0,50 à 2,00 m., soit 1,25 m. en moyenne.

Prix de revient. — Ici, comme pour la vitesse, bien des éléments variables rendent difficile une comparaison du prix des divers ouvrages exécutés. Afin de dégager ce prix, le tableau ci-après comporte, pour les ouvrages connus, le diamètre de l'ouvrage, son prix moyen, le poids et la valeur de la fonte employée, le cube des déblais correspondant au diamètre intérieur et le prix de revient de ce déblai par mètre cube, obtenu en divisant par ce cube la dépense totale, déduction faite de la fourniture de fonte.

PRIX DE REVIENT D'OUVRAGES EXÉCUTÉS

DÉSIGNATION des ouvrages.	DIAMÈTRE utile.	POIDS de fonte en tonnes.	VALEUR de la fonte à 200 fr. la tonne.	CUBE des déblais	PRIX de revient du mètre cube de déblai.	PRIX de revient.
	Mètres.				Fr.	Fr.
Concorde	1,80	1,3	260	2,54	600	1 800
Tour de Londres . . .	2,00	1,4	280	3,14	121	660
Clichy (siphon) . . .	2,30	2,1	420	4,15	381	2 000
Kingston	2,54	»	270	5,07	76	665
City and South London.	3,11	2,8	560	7,60	89	1 233
Glasgow district. . . .	3,35	3,3	660	10,50	146	2 200
Waterloo and City . . .	3,80	3,5	700	11,54	141	2 300
Glasgow harbour . . .	4,90	6,8	1 360	18,86	45	2 200
Hudson.	5,48	9,5	1 900	23,59	131	5 000
Saint-Clair	6,04	13,9	2 780	28,65	102	5 700
Blackwall.	7,62	15,7	3 140	45,60	260	15 000

Les siphons de la Concorde et de Clichy donnent des prix très

élevés, parce qu'il n'a pas été possible d'isoler du forfait les puits et autres ouvrages accessoires. Au contraire, le souterrain de Glasgow donne un prix très bas, parce que le calcul du prix de revient tient compte de parties exécutées sans air comprimé. Enfin, au souterrain de Blackwall, il a fallu lutter contre des difficultés exceptionnelles et, en outre, le prix donné doit comprendre les aménagements intérieurs, notamment l'enveloppe eu briques vernissées.

Toutefois les chiffres de l'avant-dernière colonne montrent que le prix du déblai varie de 100 fr. pour les travaux relativement faciles à 150 fr. pour les travaux en mauvais sol.

Ce renseignement suffit pour établir, pour chacune de ces deux catégories de terrains, le prix de revient d'un ouvrage avec revêtement en fonte ou en maçonnerie. On supposera, en outre, que les boucliers sont payés 1 000 fr. la t. et ne font qu'un parcours de 500 m.; et que le prix des revêtements en maçonnerie ou en fonte sont ceux résultants des tableaux des pages 405 et 406. Au total, on ajoutera 15 p. 100 de faux frais et bénéfice et on obtiendra les prix de revient figurant dans les dernières colonnes.

Quoique ces prix soient évidemment sujets à bien des variations suivant les localités et les circonstances, la comparaison avec certains prix connus figurant dans la colonne d'observations montre qu'ils se rapprochent très sensiblement des résultats pratiques.

Souterrains courants. — Les travaux du collecteur Clichy constituent l'application du bouclier aux souterrains courants pour lesquels les prix de maçonnerie et de fouille sont bien inférieurs à ceux qui viennent d'être donnés ci-dessus.

La maçonnerie s'exécute plus aisément avec un bouclier que par les méthodes anciennes dans l'embarras des étais : il est donc permis de dire qu'il y aura plutôt économie. Il en est de même des déblais qui se font en pleine masse sur un front bien libre, au lieu d'opérer par reprises successives. La véritable économie néanmoins provient du remplacement des boisages par le bouclier.

Un souterrain de chemin de fer à deux voies revient en moyenne à 1 500 fr. et les boisages constituent souvent le 1/3 de la dépense; en admettant même la proportion rare du cinquième, les boisages

PRIX DE REVIENT D'UN SOUTERRAIN A L'AIR COMPRIMÉ SOUS UNE RIVIÈRE

DIAMÈTRE	TERRAINS DE DIFFICULTÉ MOYENNE									TERRAINS TRÈS DIFFICILES								
	BOUCLIER		DÉBLAIS		PRIX du revêtement.		PRIX TOTAL avec 15 p. 100 pour faux frais.		OBSERVATIONS	BOUCLIER		DÉBLAIS		PRIX du revêtement		PRIX TOTAL avec 15 p. 100 pour faux frais.		OBSERVATIONS
	Poids en tonnes.	Valeur par mètre courant à $\frac{1\,000}{500} = 2$ fr. la tonne.	Cube.	Valeur par mètre courant à 100 fr. le mètre cube.	En fonte.	En maçonnerie.	En fonte.	En maçonnerie.		Poids en tonnes.	Valeur par mètre courant à $\frac{1\,000}{500} = 2$ fr. la tonne.	Cube.	Valeur par mètre courant à 150 fr. le mètre cube.	En fonte.	En maçonnerie.	En fonte.	En maçonnerie.	
M.		Fr.									Fr.							
2	5	10	3,14	314	200	188	600	600	Tour de Londres 660.	6	12	3,14	471	260	426	850	1 050	Siphon de Clichy. 2 000.
3	10	20	7,06	706	450	329	1 350	1 250	City and South London. 1 233.	12	24	7,06	1 059	600	672	1 950	2 050	Glasgow district. 2 200.
4	20	40	12,56	1 256	800	502	2 450	2 100	Waterloo and City. 2 300.	25	50	12,56	1 884	1 060	1 036	3 450	3 450	
5	30	60	19,63	1 963	1 350	707	3 900	3 150	Glasgow harbour. 2 200.	40	80	19,63	2 944	1 660	1 473	5 400	5 200	
6	40	80	28,67	2 867	1 800	942	5 500	4 450	Hudson. 5 000.	60	120	28,67	4 240	2 400	1 980	7 800	7 300	
7	50	100	38,48	3 848	2 450	1 300	7 400	6 050	St-Clair. 5 700.	80	160	38,48	5 772	3 260	2 556	10 600	9 900	
8	60	120	50,26	5 026	3 200	1 508	9 600	7 600		100	200	50,26	7 539	4 260	3 196	13 600	12 600	Blackwall. 15 000.
9	80	160	63,62	6 362	4 050	1 838	12 200	9 650		120	240	63,62	9 543	5 400	3 922	17 500	15 800	
10	100	200	78,54	7 854	5 000	2 180	15 000	11 800		150	300	78,54	11 781	6 600	4 671	21 500	19 300	

coûteraient 300 fr., tandis que l'amortissement d'un bouclier pesant 100 t. et coûtant 100 000 fr., sur la longueur parfaitement admissible d'un kilomètre, n'entraîne qu'une dépense de 100 fr.

Il est donc possible d'affirmer que pour les souterrains de cette nature il y a économie, sécurité et rapidité à employer le bouclier.

On a essayé dans le tableau ci-après de déterminer pour divers diamètres le prix de revient de souterrains de cette nature par les deux méthodes. La maçonnerie est comptée pour 50 fr., la fouille boisée 18 fr., la fouille non boisée 12 fr. et l'amortissement du bouclier à 1 fr. par tonne et par mètre courant : ce qui suppose un parcours de 1 kilomètre. On a supposé, pour simplifier, la section circulaire.

PRIX DE REVIENT D'UN SOUTERRAIN ORDINAIRE

DIAMÈTRE UTILE	MAÇONNERIE		DÉBLAIS			AMORTISSEMENT du bouclier.	PRIX de revient.		OBSERVATIONS
	Cube.	Valeur à 50 francs le mètre cube.	Cube.	Valeur avec boisage à 18 francs le mètre cube.	Valeur sans boisage à 12 francs le mètre cube.		Avec boisage.	Avec bouclier.	
2	1,88	94	5,02	90,4	60,2	10	185	165	
3	3,29	164,5	10,35	186,3	124,2	20	350	310	
4	5,02	251	17,58	316,4	150,7	40	570	450	
5	7,07	353,5	25,70	480,6	320,4	60	850	750	Collecteur Clichy.
6	9,42	471	37,69	678,4	452,3	80	1 150	1 000	
7	13	650	51,48	926,6	617,8	100	1 600	1 400	Souterrain de chemin de fer à 2 voies.
8	15,08	754	65,34	1 176,1	784,1	120	1 925	1 650	
9	18,38	919	82	1 476	984	160	2 400	2 000	
10	21,80	1 090	100,34	1 817,1	1 204,1	200	2 900	2 500	

Il résulte de ce tableau que la méthode du bouclier produirait une économie variant avec le diamètre de 20 à 400 fr. par mètre courant. Pour le diamètre du collecteur Clichy, l'économie est de plus de 100 fr. et pour un souterrain de chemin de fer à 2 voies de 2 à 300 fr.

CHAPITRE XVIII

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Le bouclier a dans sa forme et ses applications passé par plusieurs phases bien distinctes.

En premier lieu, on a vu le type créé pour travailler dans l'argile de Londres ; il est composé d'une enveloppe cylindrique en tôle, renforcée à l'avant par un anneau en fonte. Les lames d'acier, fixées sur cet anneau, forment un couteau placé dans un plan vertical. En arrière de la chambre de travail, réduite souvent à 0, 30 m. de longueur et qu'il serait préférable d'allonger, se trouve une cloison largement ouverte permettant de fermer temporairement l'avancement mais n'offrant aucune sécurité. Le corps du bouclier est renforcé par un second anneau de fonte sur lequel sont fixés les vérins servant à l'avancement; ces vérins sont alimentés par des pompes à bras et espacés d'environ 1, 75 m. ils travaillent généralement à une pression de 70 kg. et permettent de développer un effort de 5 t. par mètre carré de surface de frottement. La queue très lisse sert au montage des anneaux. Avec les très grands diamètres, les anneaux de fonte et la cloison sont remplacés par des divisions horizontales et verticales servant de plate-forme de travail et d'entretoisement pour l'enveloppe.

Avec les terrains mous, aquifères, dangereux, le bouclier est modifié. Dans la chambre de travail, l'anneau de fonte a été remplacé par des goussets, revêtus d'une seconde paroi concentrique se rabattant vers la paroi extérieure, de manière à présenter une surface coupante bien lisse. La chambre de travail, assez profonde pour permettre le séjour des ouvriers, est divisée en cellules par des planchers et des cloisons verticales espacés d'en-

viron 2, 00 m. La cloison est munie de portes petites et nombreuses disposées pour se fermer rapidement. En avant ou en arrière de ces portes, des diaphragmes fixes limitent l'échappement de l'air et l'invasion de l'eau. Le corps du bouclier disparaît. Les vérins sont logés dans la chambre de travail derrière la double enveloppe. L'effort à faire, pouvant atteindre 20 t. par mètre carré de surface frottante, les vérins sont rapprochés à 0,90 m. les uns des autres ; ils travaillent à haute pression et sont alimentés par une installation fixe.

Avec les terrains ébouleux, dans le cas d'un travail sous l'eau avec une forte charge hydrostatique, le bouclier est analogue, mais il se complète par un blindage du front de taille. On a trop souvent voulu appliquer dans ce cas les boucliers de la première catégorie en les complétant par un boisage exécuté en avant et en dehors du bouclier, maintenu par des étais allant prendre point d'appui sur le revêtement en passant à travers les ouvertures de la cloison. Ce n'est que tout récemment, au souterrain de Blackwall, que les ingénieurs anglais sont parvenus à réaliser un blindage appuyé contre le bouclier pouvant cependant se déplacer par rapport à lui.

Quand il n'y a plus à craindre l'effet de l'eau, mais simplement les éboulements, il faut recourir au dernier type créé, celui du collecteur Clichy avec un avant-bec en visière, un corps solidement entretoisé, des plates-formes de travail, des vérins d'une puissance moyenne et un arrière-bec pouvant servir à abriter la construction d'une maçonnerie aussi facilement que la pose d'un revêtement métallique. Les conditions de construction de ce bouclier ne sont pas encore définitives. Il semble que l'entretoisement de l'enveloppe doit être surtout demandé à de fortes cloisons verticales et horizontales; que ces dernières, servant de plates-formes de travail doivent glisser sous le talus des terres à chaque étage et former elles-mêmes trousses coupantes ; que le corps peut être raccourci et les vérins logés entre les goussets soutenant la visière ; que la cloison enfin et la seconde enveloppe peuvent disparaître. Les pompes alimentant les vérins peuvent être logées dans le bouclier et actionnées par un petit moteur électrique.

Il reste à réaliser un bouclier mixte pour le cas où la partie

basse du souterrain est seule dans l'eau et dans un terrain affouillable et ébouleux. Il devrait permettre de diviser la chambre de travail en plusieurs étages dans lesquels les ouvriers pourraient suivant les besoins, travailler à l'air libre ou à l'air comprimé ; il faudrait que chaque étage fût isolé par des planchers étanches et que les fronts de taille fussent séparés par une couche de terre assez épaisse pour réduire les pertes d'air. Il ne paraît pas impossible d'y arriver.

Le revêtement métallique circulaire a, jusqu'à une époque récente, été exclusivement employé. La forme cylindrique, adoptée primitivement par imitation avec les puits verticaux, est cependant peu commode au point de vue de l'utilisation de la section. Elle ne paraît pas indispensable pour la résistance et n'a comme avantage bien net que d'utiliser des segments tous semblables entre eux. En raison de la fixité même du type, il est possible de déduire des lois et des formules donnant pour tous les cas le poids et les dispositions principales de ce revêtement et de déterminer le meilleur dispositif à adopter pour les joints.

Malheureusement le poids de fonte devient vite excessif et la dépense inabordable. On a essayé du fer, mais jusqu'à présent sans grand succès. Le retour à l'enveloppe en maçonnerie pouvait seul donner une réelle économie. D'ailleurs, réussir à exécuter un souterrain maçonné avec le bouclier, c'était lui ouvrir tout un champ nouveau d'applications. Au lieu d'en limiter l'emploi aux travaux très difficultueux ou très dangereux, cette transformation devait en faire un outil d'un usage courant pour tous les souterrains ; bien plus, elle rendait possible dans les grandes villes la construction de souterrains à fleur de sol, qui nécessitaient jusque-là, avec la maçonnerie, des ouvertures de fouille inadmissibles ou, avec la fonte, des dépenses inabordables. Ce changement, d'apparence si modeste, est une révolution dont l'importance apparaîtra chaque jour davantage.

Les travaux du collecteur de Clichy ont réalisé ce progrès et montré qu'au point de vue de la rapidité d'exécution, de la résistance, de l'étanchéité et de la facilité d'emploi du bouclier, la maçonnerie ne le cédait en rien à la fonte et permettait même de réaliser une économie sensible. L'enveloppe métallique paraît donc

devoir être réservée à certains travaux exécutés sous l'eau dans les conditions les plus dangereuses.

Quel que soit son type et quelque application qu'on en fasse, le bouclier n'est pas un instrument dont on puisse abandonner la direction à des manœuvres. L'insouciance ou la brutalité des ouvriers avaient causé de graves avaries au bouclier de Brunel; les mêmes causes ne manqueraient pas de produire le même effet. Avec toute sa machinerie hydraulique, le bouclier est un instrument, qui, si les vérins sont suffisamment multipliés, obéit avec précision ; mais il faut en confier la direction à un homme compétent.

Pour tirer du bouclier tout le bénéfice qu'on est en droit d'en espérer, il faut éviter les tassements et, pour cela conduire la fouille avec méthode et prudence, de manière à empêcher la création de poches ou d'affouillements. Sauf le cas où il est impossible de voir ce qui se passe au delà de la cloison, en employant au besoin un blindage au front d'attaque, le bouclier peut découper exactement avec son couteau le vide du souterrain. Si le travail s'effectue à fleur de sol et que le vide, laissé par l'avancement du bouclier derrière le revêtement, suffise à provoquer un tassement dangereux, il faut avoir recours à l'appareil d'injection imaginé par Greathead, dont l'emploi permet d'empêcher tout mouvement. On ne pourrait en dire autant avec les anciens procédés ; car les bourrages à pierres sèches, les bois abandonnés dans la fouille déterminent tôt ou tard des tassements.

L'histoire du bouclier peut se résumer en quelques mots. Il fut appliqué, au début, par Brunel à l'un des travaux les plus difficiles que l'on puisse imaginer. Les Anglais l'ont perfectionné et simplifié dans des travaux faits sous les rivières, mais dans un terrain qui se tient bien, l'argile de Londres. Le type ainsi créé a été transformé pour passer sous les rivières dans la boue et la vase, c'est la seconde étape, dont le plus beau spécimen est le souterrain de la rivière Saint-Clair. La traversée, dans les mêmes conditions, d'un terrain ébouleux de sable ou de gravier, a été la troisième phase représentée par le souterrain de Blackwall, sous la Tamise.

Les ingénieurs s'étaient habitués ainsi à considérer son emploi comme réservé aux travaux où le besoin de sécurité primait la question de dépense. Aussi n'eut-on l'idée de l'appliquer aux

ouvrages maçonnés que pour un travail exécuté à une profondeur infime sous la voie publique, où il fallait à tout prix éviter une interruption de circulation. On eut alors la surprise de voir qu'il avait bien d'autres qualités méconnues et, en particulier, qu'il permettait d'exécuter, vite et à bon compte, toute espèce de souterrain.

Ainsi dans les travaux sous l'eau, dans les travaux urbains, et même dans les travaux courants, il y a avantage à employer le bouclier. L'avenir est donc à ceux qui sauront l'utiliser.

C'est à eux que s'adresse cet ouvrage. Les conclusions et les règles qui viennent d'être formulées dans les derniers chapitres, pourront peut-être les guider dans la construction et l'emploi du bouclier. S'ils n'y trouvent pas toujours des renseignements aussi complets et aussi précis qu'ils les pourraient souhaiter, ils voudront bien accorder que rien n'a été épargné pour mettre à leur disposition les résultats de l'expérience. Les recherches ont été longues et, au milieu de documents incomplets et parfois contradictoires, il a été souvent difficile de déterminer les conditions vraies dans lesquels ont été exécutés des travaux aussi nombreux que peu connus.

Les ingénieurs et les entrepreneurs éminents, qui ont pris part aux travaux énumérés et aux publications desquels il a été fait de nombreux emprunts, voudront bien reconnaître que leurs œuvres ont toujours été étudiées avec la plus grande impartialité et souvent avec la plus profonde admiration pour leur énergie et leur habileté. En signalant les difficultés, contre lesquelles ils ont lutté avec tant d'ingéniosité, il n'y a eu aucune pensée de critique, mais au contraire un vif désir de faire ressortir, combien chacun d'eux s'est appliqué à perfectionner l'engin et a su trouver le moyen de triompher de multiples obstacles.

En livrant à la discussion le fruit de ses réflexions et de ses observations, en exprimant nettement son opinion, l'auteur a cru remplir un devoir, et il a le sentiment de n'avoir rien avancé qui ne fût le résultat d'une étude consciencieuse, d'une conviction profonde et, il l'espère justifiée.

BARÈME

DE CONVERTISSEMENT DES MESURES ANGLAISES EN MESURES FRANÇAISES

POUCES		PIEDS (12 pouces).			
	Mètres.		Mètres.		Mètres.
1	0,02.53.99.54	1	0,30.47.94.49	25	7,61.98.62.2
2	0,05.07.99.08	2	0,60.95.88.98	26	7,92.46.56.7
3	0,07.61.98.62	3	0,91.43.83.48	27	8,22.94.51.2
4	0,10.15.98.16	4	1,21.91.77.96	28	8,53.42.45.7
5	0,12.69.97.70	5	1,52.39.72.45	29	8,83.90.40.2
6	0,15.23.97.24	6	1,82.87.66.94	30	9,14.38.34.6
7	0,17.77.96.78	7	2,13.35.61.43	31	9,44.86.29.1
8	0,20.31.96.32	8	2,43.83.55.92	32	9,75.34.23.6
9	0,22.85.95.86	9	2,74.31.50.41	33	10,05.82.18.1
10	0,25.39.95.40	10	3,04.79.44.9	34	10,36.30.12.6
11	0,27.93.94.94	11	3,35.27.39.4	35	10,66.78.07 1
12	0,30.47.94.49	12	3,65.75.33.8	36	10,97.26.01.6
13	0,33.01.94.03	13	3,96.23.28.3	37	11,27.73.96.1
14	0,35.55.93.57	14	4,26.71.22.8	38	11,58.21.90.6
15	0,38.09.93.11	15	4,56.19.17.3	39	11,88.69.85.1
16	0,40.63.92.65	16	4,87.67.11.8	40	12,19.17.79.6
17	0,43.17.92.19	17	5,18.15.06.3	41	12,49.65.74.1
18	0,45.71.91.73	18	5,48.63.00.7	42	12,80.13.68.5
19	0,48.25.91.27	19	5,79.10.95.2	43	13,10.61.63.0
20	0,50.79.90.81	20	6,09.58.89.7	44	13,41.09.57.5
21	0,53.33.90.35	21	6,40.06.84.2	45	13,71.57.52.0
22	0,55.87.89.89	22	6,70.54.78.7	46	14,02.05.46.5
23	0,58.41.89.43	23	7,01.02.73.2	47	14,32.53.41.0
24	0,60.95.88.98	24	7,31.50.67.7	48	14,61.35.65.5

1 yard = 3 pieds =	0.91.43.83	m.
1 fathom = 2 yards = 6 pieds =. .	1,82.87.67	—
1 perch = 5 1/2 yards = ...	5,029. 11	—
1 chain = 22 yards = 66 pieds =. .	20,11.64.37	—
1 furlong = 220 yards = 10 chains = 660 pieds =.	201,16.43.7	—
1 mile = 1 760 yards = 8 furlongs =	1 609,31.49	—
1 pouce carré =. .	6,45.13.66	cm²
1 pied carré =. . .	0,09.29	m²
1 yard carré = . .	0,83.60.97	—
1 acre =.	0,40.46.71	h.
1 mille carré = . .	2,58.88.81	km²
1 pouce cubique =	16,38.61.76	cm³
1 pied cubique = .	0,02.82.14	m³
1 yard cubique =.	0,76.45.02	—
1 pinte (1/8 gallon) =	0,56.79	lit.
1 gallon =.	4,54.34.58	—
1 bushel (8 gallons) =	36,34.76.6	—
1 sack (3 bushels) =	1,0904	hect.
1 baril = ...	163,5	lit.
1 livre =.	0,45.35.92.6	k.
1 quarter (28 liv.) =	12,69.56	kg.
1 quintal (cwt = 112 livres) =. .	50,80.2	—
1 tonne (20 cwt) =	1016,048	—
1 tonne de 2000 liv. = ...	907,1852	—

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION . . . . . .

CHAPITRE PREMIER

SOUTERRAIN SOUS LA TAMISE

(1825-1842)

Premières tentatives 1
Idées primitives de Brunel 3
Le souterrain 6
Commencement des travaux. 8
Fonçage des puits. 8
Le bouclier. 13
Manœuvre d'avancement 27
Installations diverses. 29
Première forme du bouclier. 31
Marche des travaux 32
Conclusions. 43

CHAPITRE II

PÉRIODE ANTÉRIEURE A 1870

SOUTERRAIN DE LA TOUR DE LONDRES

PREMIERS BOUCLIERS AMÉRICAINS

Premiers brevets. 45
Souterrain de la Tour de Londres 50
Projet Greathead. 54
Boucliers américains Beach 55

CHAPITRE III

CHEMIN DE FER ÉLECTRIQUE DE LA CITÉ A STOKWELL

CITY AND SOUTH LONDON RAILWAY

(1886-1890)

Exposé 62
Tracé. — Profil 63
Souterrain double 67
Courbes, pentes et rampes 67
Profils en travers 68
Voie 71
Sondage 72
Puits 72
Marche du travail 74
Stations 75
Alignement 75
Revêtement métallique 76
Boucliers 78
Injections 81
Transport des déblais 83
Traversée des terrains aquifères 83
Sas à air 86
Prix de revient 87

CHAPITRE IV

SOUTERRAIN SOUS L'HUDSON, NEW-YORK

(1879-1889)

Exposé 89
Système Haskin 90
Exécution du souterrain 95
Galerie du Nord 97
Galerie du Sud 98
Entrée provisoire 99
Emploi d'un caisson 101
Reconstructon de la partie éboulée 103
Système pilote 105
Modification du système. — M. Sooy Smith 107
Nouvelle entreprise 112
Arrêt momentané 113
Le bouclier 114
Grue de montage des segments 117
Revêtement métallique 118

Exécution du travail 119
Travail à l'air comprimé 119
Conclusions 121

CHAPITRE V

SOUTERRAIN DE LA RIVIÈRE SAINT CLAIR

(1884-1890)

Exposé 122
Souterrain de la Rivière Détroit 123
Grand trunk railway system 123
Travaux préliminaires 126
Projet définitif 127
Fonçage des puits 129
Les boucliers 130
Travail à l'air comprimé 137
Tracé de l'axe 139
Revêtement en fonte 140
Grue de montage des anneaux 145
Coupe du souterrain 146
Outillage hydraulique 146
Appareils divers. — Accessoires 150
Marche du travail 151
Dépenses 154
Remarques 154

CHAPITRE VI

DISTRIBUTION D'EAUX DE LIVERPOOL

SOUTERRAIN SOUS LA MERSEY

(1890-1892)

Exposé 157
Première entreprise 158
Deuxième entreprise 159
Reprise des puits 160
Revêtement en fonte 163
Le bouclier 164
Sas à air 167
Arrêt de l'entreprise 169
Reprise du travail 170
Consolidation du bouclier 171
Marche du travail 173
Conclusions 175

CHAPITRE VII

SOUTERRAINS DE GLASGOW SOUS LA CLYDE

I. — SOUTERRAIN DU PORT

(1890-1893)

Exposé 176
Fonçage des puits 178
Les souterrains 182
L'air comprimé 183
Les boucliers 184
Marche du travail 188

II. — CHEMIN DE FER MÉTROPOLITAIN

(1892-1896)

Exposé 190
Tracé 190
Dispositions principales des ouvrages 192
Les boucliers 193
Usines de compression 195
Exécution du travail 196
Revêtement en fonte 198
Résumé 199

CHAPITRE VIII

COMPAGNIE DE GAZ A NEW-YORK

SOUTERRAIN SOUS LA RIVIÈRE DE L'EST

(1892-1894)

Exposé 200
Etudes préliminaires 201
Dispositions générales des ouvrages 202
Fonçage des puits et attaque des galeries 202
Rencontre du terrain tendre 204
Premier travail à l'air comprimé 206
Emploi d'un revêtement en fonte 209
Reprise du travail 211
Emploi du bouclier 213
Installations accessoires 218
Marche du travail 221
Conclusions 225

CHAPITRE IX

SOUTERRAIN DE BLACWALL A WOOLWICH

(1892-1897)

Emplacement. 227
Nature du terrain 227
Description générale 228
Tranchées et souterrain 229
Revêtement métallique 233
Puits. 235
Fonçage des puits 236
Le bouclier. 238
Travail à l'air libre 243
Usine de compression 245
Sas à air 246
Travail à l'air comprimé 247
Conclusions. 251

CHAPITRE X

SIPHONS DE CLICHY ET DE LA CONCORDE

I. — SIPHON DE CLICHY

(1892-1894)

Exposé. 253
Profil en long. 253
Dimensions de l'ouvrage 254
Installations. 256
Fonçage du puits 260
Amorce de la galerie 264
Marche du travail 266
Le bouclier. 267

II. — SIPHON DE LA CONCORDE

Exposé. 267
Profil en long 267
Dimensions de l'ouvrage 269
Installations. 273
Fonçage du puits 275
Amorce de la galerie. 276
Marche du travail 277
Le bouclier. 280

III. — RÉSUMÉ

Résumé. 280

CHAPITRE XI

WATERLOO AND CITY RAILWAY

(1894-1897)

Exposé 281
Tracé 282
Profil 284
Stations 285
Coupes en travers 285
Implantation des ouvrages 287
Echafaudage en rivière 288
Fonçage des puits 288
Boucliers 289
Avancement dans l'argile 293
Transport des déblais 295
Courbes 296
Sas à air 296
Emploi de l'air comprimé 298
Bouclier modifié 299
Station de la Cité 301

CHAPITRE XII

COLLECTEUR CLICHY EXTRA MUROS

(1895-1897)

Exposé 305
Profils en long et en travers 305
Programme d'exécution 307
Le bouclier 309
Vérins. — Poutre mobile 313
Appareils accessoires 315
Fonctionnement de l'appareil 317
Exécution des maçonneries 319
Organisation générale du chantier 320
Marche du travail 322
Tassements 325
Conclusions 326

CHAPITRE XIII

COLLECTEUR CLICHY INTRA MUROS

(1896-1897)

Exposé 327
Le bouclier 328

Les cintres 332
Vérins 335
Le transporteur 337
Assainissement 340
Plancher et rampe de service 340
Fonctionnement de l'appareil 342
Exécution de la maçonnerie 342
Appareils accessoires 343
Organisation générale 344
Marche du travail 345
Observations 347

CHAPITRE XIV

OUVRAGES DIVERS

Anvers 349
Glasgow 351
Rlackton 354
Kingston 355
Brooklyn 356
Edimbourg 357
Melbourne 357
Emmersberg 361
Berlin 362

CHAPITRE XV

LE BOUCLIER

Exposé 369
Enveloppe 370
Couteau 370
Avant-bec 372
Divisions horizontales 375
Divisions verticales 377
La cloison 378
Corps du bouclier 381
Queue 383
Longueur totale 383
Vérins 383
Poids des boucliers 386
Blindage du front d'attaque 386
Dispositions relatives à l'emploi de l'air comprimé 388

CHAPITRE XVI

LE REVÊTEMENT

Forme 393
Composition du revêtement en fonte 396
Joints 398
Qualités et défauts du revêtement en fonte 400
Revêtement en fer 401
Montage du revêtement métallique 402
Mode d'appui des vérins 402
Revêtement en maçonnerie 403
Comparaison entre le revêtement métallique et le revêtement en maçonnerie 404

CHAPITRE XVII

CONDITIONS GÉNÉRALES D'EMPLOI DE LA MÉTHODE

Direction. 411
Évacuation des déblais 412
Exécution des terrassements. 413
Tassements. 415
Profondeur de l'ouvrage 416
Sas à air. 417
Joint du bouclier et du revêtement 419
Parcours des boucliers 420
Vitesse d'avancement. 421
Prix de revient 422

CHAPITRE XVIII

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Résumé et conclusions. 426

CATALOGUE DE LIVRES

SUR LA

CONSTRUCTION ET LES TRAVAUX PUBLICS

PUBLIÉS PAR

LA LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE BAUDRY ET Cie

15, RUE DES SAINTS-PÈRES, A PARIS

Le catalogue est envoyé franco sur demande.

Annales de la construction.

Nouvelles Annales de la construction, fondées par Oppermann. — 12 livraisons par an, formant 1 beau volume de 50 à 60 planches et 200 colonnes de texte.

Abonnements : Paris, 15 fr. — Départements et Belgique, 18 fr. — Union postale, 20 fr.

Prix de l'année parue, reliée, 20 fr.

Table des matières des années 1876 à 1887, 1 brochure in-12. . . . . 50 c.

Agenda Oppermann.

Agenda Oppermann paraissant chaque année. Elégant carnet de poche contenant tous les chiffres et tous les renseignements techniques d'un usage journalier. Rapporteur d'angles, coupe géologique du globe terrestre, guide du métreur. — Résumé de géodésie. — Poids et mesures, monnaies françaises et étrangères. — Renseignements mathématiques et géométriques. — Renseignements physiques et chimiques. — Résistance des matériaux. — Electricité. — Règlements administratifs. Dimensions du commerce. — Prix courants et séries de prix. — Tarifs des Postes et Télégraphes. Relié en toile, 3 fr. ; en cuir, 5 fr. — Pour l'envoi par la poste, 25 c. en plus.

Aide-mémoire de l'ingénieur.

Aide-mémoire de l'ingénieur. Mathématiques, mécanique, physique et chimie, résistance des matériaux, statique des constructions, éléments des machines, machines motrices, constructions navales, chemins de fer, machines-outils, machines élévatoires, technologie, métallurgie du fer, constructions civiles, législation industrielle. Troisième édition française du Manuel de la Société « Hütte » par Philippe Huguenin. 1 volume in-12 contenant plus de 1 200 pages, avec 500 figures dans le texte, solidement relié en maroquin. . . . . 15 fr.

Aide-mémoire des conducteurs des ponts et chaussées.

Aide-mémoire des conducteurs et commis des Ponts et Chaussées, agents voyers, chefs de section, conducteurs et piqueurs des chemins de fer, contrôleurs des mines, adjoints du génie, entrepreneurs et, en général, de toute personne s'occupant de travaux, par Eug. Petit, conducteur des Ponts et Chaussées. 1 volume in-12, avec de nombreuses figures dans le texte, solidement relié en maroquin . . . . . 15 fr.

Traité de constructions civiles.

Traité de constructions civiles. Fondations, maçonnerie, pavages et revêtements, marbrerie, vitrerie, charpente en bois et en fer, couverture, menuiserie et ferrures, escaliers, monte-plats, monte-charges et ascenseurs, plomberie d'eau et sanitaire, chauffage et ventilation, décoration, éclairage au gaz et à l'électricité, acoustique, matériaux de construction, résistance des matériaux, renseignements généraux, par E. Barberot, architecte. 1 volume in-8°, avec 1554 figures dans le texte dessinées par l'auteur. Relié . . . . . 20 fr.

Cours de construction.

Cours pratique de construction, rédigé conformément au programme officiel des connaissances pratiques exigées pour devenir ingénieur, par Prud'homme.

Terrassements, — ouvrages d'art, — conduite des travaux, — matériel, — fondations, — dragage, — mortiers et bétons, — maçonnerie, — bois, — métaux, — peinture, jaugeage des eaux, — règlement des usines, etc. 4e édition. 2 volumes in-8°, avec 363 figures dans le texte . . . 16 fr.

Maçonnerie.

Architecture et constructions civiles. Maçonnerie ; pierres et briques ; leur emploi dans les maçonneries ; proportion des murs ; fondations ; murs de cave et murs en élévation ; des mou-

lures et des ordres ; décoration des murs extérieurs des édifices ; cloisons, planchers, voûtes ; escaliers en maçonnerie ; éléments de décoration intérieure ; revêtement des sols ; roches naturelles ; chaux et ciments ; du plâtre, produits céramiques, par J. Denfer, architecte, professeur à l'École centrale, 2 volumes grand in-8°, avec 794 figures dans le texte . . . . . 40 fr.

Charpente en bois et menuiserie.

Architecture et constructions civiles. Charpente en bois et menuiserie ; les bois, leurs assemblages ; résistance des bois ; tableaux, calculs faits ; linteaux et planchers ; pans de bois ; combles ; étaiements, échafaudages, appareils de levage ; travaux hydrauliques, cintres, ponts et passerelles en bois ; escaliers ; menuiserie en bois ; parquets, lambris, portes, croisées, persiennes, devantures, décoration, par J. Denfer, architecte, professeur à l'École centrale. 1 volume grand in-8°, avec 680 figures dans le texte . . . . . 25 fr.

Terrassements, tunnels, etc.

Procédés généraux de construction. Travaux de terrassement, tunnels, dragages et dérochements, par Ernest Pontzen, 1 volume grand in-8°, avec 234 figures dans le texte . . . . . 25 fr.

Mesurage et métrage.

Traité pratique et complet de tous les mesurages, métrages, jaugeages de tous les corps, appliqué aux arts, aux métiers, à l'industrie, aux constructions, aux travaux hydrauliques, aux nivellements pour construction de routes, de canaux et de chemins de fer, drainage, etc., enfin à la rédaction de projets de toute espèce de travaux du ressort de l'architecture et du génie civil et militaire, terminé par une analyse et série de prix avec détails sur la nature, la qualité, la façon et la mise en œuvre des matériaux, par E. Sergent, 8e édition, 2 volumes grand in-8° et 1 atlas de 47 planches in-folio . . . . . 50 fr.

Coupe des pierres.

Traité pratique de la coupe des pierres, précédé de toute la partie de la géométrie descriptive qui trouve son application dans la coupe des pierres, par Lejeune. 1 volume in-8° et 1 atlas in-4° de 59 planches, contenant 381 figures . . . . . 40 fr.

Coupe des pierres.

Coupe des pierres, précédée des principes du trait de stéréotomie, par Eugène Rouché, examinateur de sortie à l'École Polytechnique, professeur au Conservatoire des Arts et Métiers, et Charles Brisse, professeur à l'École centrale et à l'École des Beaux-Arts, répétiteur à l'École Polytechnique, 1 volume grand in-8° et un atlas in-4° de 33 planches . . . . . 25 fr.

Matériaux de construction.

Connaissance, recherche et essais des matériaux de construction et de ballastage, par Em. Baudson, chef de section des travaux neufs au chemin de fer du Nord. 1 volume grand in-8°. . . . . 6 fr.

Chimie appliquée à l'art de l'ingénieur.

Chimie appliquée à l'art de l'ingénieur. *Première partie :* Analyse chimique des matériaux de construction, par Ch. Léon Durand-Claye, inspecteur général, ancien professeur et ancien directeur du Laboratoire à l'École des Ponts et Chaussées, et Deroméc, chimiste de ce Laboratoire. *Seconde partie :* Étude spéciale des matériaux, d'agrégation des matériaux, par René Feret, ancien élève de l'École Polytechnique, chef du Laboratoire des Ponts et Chaussées à Boulogne-sur-Mer. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte . . . . . 15 fr.

Chaux et sels de chaux.

Chaux et sels de chaux appliqués à l'art de l'ingénieur, par Grange, agent voyer en chef du département de la Vienne. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte. . . . . 18 fr.

Carrières de pierre de taille.

Recherches statistiques et expériences sur les matériaux de construction. Répertoire des carrières de pierre de taille exploitées en 1889, publié par le Ministère des Travaux publics et contenant pour chaque carrière : sa désignation et le nom de la commune où elle est située, le mode d'exploitation, le nombre et la hauteur des bancs, la désignation usuelle de la pierre, la nature de la pierre, la position géologique de la carrière, le poids moyen par mètre cube et la résistance à l'écrasement par centimètre carré des échantillons essayés. 1 volume in-4° . . . . . 10 fr.

Congrès des procédés de construction.

Congrès international des procédés de construction tenu en 1889 sous la présidence de M. Eiffel. Comptes rendus des séances et visites du Congrès, par Auguste Moreau et Georges Petit, secrétaires du Congrès. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte et 8 planches. 15 fr.

Murs de soutènement.

Études théoriques et pratiques sur les murs de soutènement et les ponts et viaducs en maçonnerie, par Dubosque, sous-ingénieur des Ponts et Chaussées, ancien chef de bureau des travaux neufs

à la Compagnie du Nord. 5e édition, revue, corrigée et augmentée. 1 volume grand in-8°, avec 15 planches et 141 figures, relié . . . . . 15 fr.

Consolidations des talus.

Traité de consolidation des talus, routes, canaux et chemins de fer, par R. Bruère, ingénieur civil. 1 vol. in-12 et atlas in-8° de 25 pl. doubles . . . . . 10 fr.

Statique graphique.

Éléments de statique graphique, par Eugène Rouché, examinateur de sortie à l'Ecole Polytechnique, professeur de statique graphique au Conservatoire des arts et métiers. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte. . . . . 12 fr. 50

Statique graphique.

Applications de la statique graphique. Charges des ponts et des charpentes, poutres droite, courbes, pleines, à treillis, continues ; arcs métalliques ; fermes métalliques ; piles métalliques ; influence du vent sur les constructions ; déformations ; calcul des poutres pour le lançage et le montage ; piles en maçonnerie ; calcul des joints des poutres ; formules et tables usuelles, par Kœchlin, ingénieur de la maison Eiffel. 1 volume grand in-8° et 1 atlas de 30 planches. . 30 fr.

Statique graphique.

Eléments de statique graphique appliquée aux constructions. 1re *partie :* Poutres droites, poussée des terres, voûtes, par Muller-Breslau (traduction par Sevrig). 2e *partie :* Poutres continues, applications numériques, par Sevrig, ingénieur-constructeur du pont du Douro. 1 volume grand in-8° et un atlas in-4° de 20 planches en 3 couleurs. . . . . 20 fr.

Statique graphique.

Traité de statique graphique appliquée aux constructions, toitures, planchers, poutres, ponts, etc. — Eléments du calcul graphique ; des forces et de leur résultante, des moments fléchissants, des efforts tranchants, recherche des maxima, charge permanente, surcharge uniformément répartie, surcharge mobile, données pratiques sur le poids propre des toitures et sur leur surcharge accidentelle, poutres pleines, poutres à treillis simples et multiples, centre de gravité, moment d'inertie, exemples et applications, par Maurice Maurer, 2e édition. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte, et 1 atlas de 20 planches in-4°. . . . . 12 fr. 50

Résumé des connaissances mathématiques.

Résumé des connaissances mathématiques nécessaires dans la pratique des travaux publics et de la construction, par E. Mussat, ingénieur des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec 133 figures dans le texte . . . . . 10 fr.

Traité de topographie.

Traité de topographie. — Appareils d'optique, applications de la géodésie à la topographie, instruments de mesure, levé des plans de surface, levés souterrains, théorie des erreurs, par André Pellétan, ingénieur en chef des Mines, professeur à l'Ecole des Mines. 1 volume grand in-8°, avec 235 figures dans le texte. Relié. . . . . 15 fr.

Cours de topographie.

Cours de topographie. Levé des plans de surface et des plans de mines, par Alfred Habets, ingénieur honoraire des mines, professeur à l'Université de Liège. 2e édition, revue et augmentée, 1 volume grand in-8°, avec 107 figures dans le texte. . . . . 8 fr.

Levé des plans et nivellement.

Levé des plans et nivellement. Opérations sur le terrain, opérations souterraines, nivellement de haute précision, par Léon Durand-Claye, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Pellétan et Lallemand, ingénieurs des mines. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte . . . 25 fr.

Nivellement.

Traité du nivellement, comprenant les principes généraux, la description et l'usage des instruments, les opérations et les applications, par Duplessis. 1 volume in-8°, contenant 112 figures. 8 fr.

Tables tachéométriques.

Tables tachéométriques, donnant aussi rapidement que la règle logarithmique tous les calculs nécessaires à l'emploi du tachéomètre, par Louis Pons, ingénieur d'études de chemins de fer, 1 volume in-8°, relié . . . . . 10 fr.

Courbes de raccordement.

Nouvelles tables pour le tracé des courbes de raccordement en arc de cercle (chemins de fer, canaux, routes et chemins), par Chauvac de La Place. 5e édition. 1 volume in-12, relié. . 7 fr. 50.

Mouvement des terres.

Théorie et pratique du mouvement des terres d'après le procédé Bruckner, par Ernest Henry, inspecteur général des ponts et chaussées, 1 vol. gr. in-8° . . . . . 2 fr. 50

Construction des chemins de fer.

Instructions pour la préparation des projets et la surveillance des travaux de construction de la plate-forme des chemins de fer, suivies de tables pour le calcul des courbes et pour l'évaluation des volumes des déblais et des remblais, par L. Partiot, inspecteur général des Ponts et Chaussées. 1 volume petit in-4°, avec 8 planches et de nombreuses figures intercalées dans le texte, relié. 15 fr.

Tracé des chemins de fer.

Tracé des chemins de fer, routes, canaux, tramways, etc. Études préliminaires, études définitives, — recherche et choix des matériaux de construction et de ballastage, par Em. Baudson, chef de section des travaux neufs au chemin de fer du Nord. 1 volume grand in-8°, avec 4 planches et 95 figures intercalées dans le texte . . . . . 10 fr.

Cours de routes.

Cours de routes professé à l'École des Ponts et Chaussées. Disposition d'une route, étude et réaction des projets, construction, entretien, par Ch.-Léon Durand-Claye, inspecteur général des ponts et chaussées. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte . . . . . 20 fr.

Pavage en bois.

Le bois et ses applications au pavage à Paris, en France et à l'étranger. Divers systèmes de pavage en bois ; bois employé au pavage ; étude des propriétés physiques, mécaniques, anatomiques et chimiques des bois ; conservation et préparation des bois ; fabrication des pavés ; entretien et durée des pavages en bois ; pavage en bois dans les voies à tramways ; régime des sociétés de pavage en bois ; contrats et cahiers des charges ; fonctionnement du système de la régie, à Paris ; prix de revient, par Albert Petsche, ingénieur des Ponts et Chaussées, ancien ingénieur du service municipal de Paris. 1 volume in-8°, avec 223 figures dans le texte, relié. . . . 20 fr.

Traité complet des chemins de fer.

Traité complet des chemins de fer. Historique et organisation financière, construction de la plate-forme, ouvrages d'art, voie, stations, signaux, matériel roulant, traction, exploitation, chemins de fer à voie étroite, tramways, par G. Humbert, ingénieur des ponts et chaussées. 3 volumes grand in-8°, avec 700 figures dans le texte . . . . . 50 fr.

Chemins de fer. Notions générales et économiques.

Chemins de fer. Notions générales et économiques. Historique, formalités et règlements relatifs à l'exécution des travaux, régimes, développements, dépenses, comparaison des voies ferrées avec les routes et les voies de navigation intérieure, prix de revient des transports sur rails, tarif et leur application, recettes d'exploitation, voie et traction, chemins de fer à voie étroite, considérations économiques, par Léon Leyout, ancien ingénieur des Ponts et Chaussées, ingénieur civil. 1 volume grand in-8° . . . . . 15 fr.

Chemins de fer. — Superstructure.

Chemins de fer. Superstructure : voie, gares et stations, signaux, par E. Dehaume, ingénieur du service central de la Compagnie du Midi, professeur du cours de Chemins de fer à l'Ecole centrale des Arts et Manufactures. 1 volume grand in-8°, avec 210 figures dans le texte et 1 atlas in-4° de 73 planches doubles . . . . . 50 fr.

Chemins de fer d'intérêt local.

Traité des chemins de fer d'intérêt local. Chemins de fer à voie étroite, tramways, chemins de fer à crémaillère et funiculaires, par H. Humbert, ingénieur des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec 212 figures dans le texe. Relié. . . . . 20 fr.

Chemins de fer à faible trafic.

Les chemins de fer à faible trafic en France. Lignes secondaires des grands réseaux, chemins de fer d'intérêt local et tramways à vapeur. Etablissement et exploitation, par A. Sampité, ingénieur des Ponts et Chaussées, sous-chef de l'exploitation des chemins de fer de l'Etat. 1 volume grand in-8° et atlas in-4° de 16 planches . . . . . 16 fr.

Chemins de fer à voie de 0,60 centimètres.

Construction et exploitation des chemins de fer à voie de 0,60 centimètres. Voie, terrassements, ouvrages d'art, machines et matériel roulant, avec étude d'un tracé entre deux points donnés, par R. Tartary, conducteur des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec 97 figures dans le texte . . . . . 10 fr.

Chemins de fer d'intérêt local et Tramways.

Chemins de fer d'intérêt local et tramways établis sous le régime de la loi du 11 juin 1880. Résumé des résultats obtenus et critique des différents systèmes employés, par H. Heude, ingénieur en chef des ponts et chaussées. 1 volume in-8°. . . . . 3 fr. 50

Chemins de fer funiculaires.

Etude des chemins de fer funiculaires. Historique et classification, étude du profil en long, résistance au mouvement des trains, engins spéciaux et voie, construction et exploitation, par Alphonse Vautier, ingénieur civil, 1 brochure grand in-8°, avec figures dans le texte . . . . . 2 fr. 50

Chemins de fer funiculaires. — Transports aériens.

Chemins de fer funiculaires. Transports aériens, par A. Lévy-Lambert, ingénieur civil. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte . . . . . 15 fr.

Tramways.

Tramway à vapeur à voie de 0m,60, de Pithiviers à Toury. — I. Description du tracé, du matériel fixe et du matériel roulant, détail des dépenses, par F. Lévin, ingénieur des Ponts et Chaussées. — II. Examen critique des résultats obtenus, par H. Heude, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec une planche . . . . . 2 fr. 50

Tramways à air comprimé.

L'air comprimé appliqué à la traction des tramways. Description de la locomotive, compresseurs, chargement de voitures et canalisation, divers modes de transport par l'air comprimé, prix de revient et conclusions, par L.-A. Barbet. 1 volume grand in-8°, avec 96 figures dans le texte. . . . . 7 fr. 50

Tramways électriques.

Les tramways électriques. Dispositions générales; voie; tramways à conducteurs aériens, souterrains, établis au niveau du sol; tramways à accumulateurs; matériel roulant; stations centrales; dépenses, par Henri Maréchal, ingénieur des Ponts et Chaussées, ingénieur de la 1re section des Travaux de Paris et du Secteur municipal d'électricité. 1 volume in-8°, avec 118 figures dans le texte, relié. . . . . 7 fr. 50

Moyens de transport.

Les moyens de transport appliqués dans les mines, les usines et les travaux publics; voitures tramways, chemins de fer, plans inclinés, trainage par câble et par chaîne, etc., organisation et matériel, par Evrard, 2 vol. in-8°, avec 1 atlas de 123 pages in-folio, contenant 1 400 figures. 100 fr.

Montagnes et torrents.

Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement, par E. Thiery, professeur à l'Ecole nationale forestière, avec une introduction par M. C. Lechalas, 1 volume grand in-8°, avec 464 figures dans le texte . . . . . 15 fr.

Hydraulique agricole.

Hydraulique agricole. Aménagement des eaux; irrigation des terres labourables, des cultures maraîchères, des jardins, des prairies, etc.; création et entretien des prairies; desséchements, dessalage, limonage et colmatage, curage; irrigation et drainage combinés; renseignements complémentaires techniques et administratifs, par J. Charpentier de Cossigny, ancien élève de l'Ecole Polytechnique, lauréat de la Société des Agriculteurs de France, ingénieur civil. 2e édition revue et augmentée. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte . . . . . 15 fr.

Hydraulique fluviale.

Hydraulique fluviale. Météorologie et hydrologie; les fleuves, grandes inondations, navigation; conditions techniques d'un grand développement de la navigation fluviale; conclusions; par M. C. Lechalas, inspecteur général des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte . . . . . 17 fr. 50

Navigation intérieure.

Guide officiel de la navigation intérieure, avec itinéraires graphiques des principales lignes de navigation et carte générale des voies navigables de la France, dressé par les soins du Ministère des Travaux publics. Documents réglementaires, nomenclature alphabétique et conditions de navigabilité, notices et tableaux des distances, itinéraires des principales lignes de navigation, itinéraires graphiques, carte au 1/1500 000e, 5e édition revue et augmentée. 1 volume in-18 jésus, avec 3 planches en couleur et une carte en couleur de 0m,70 sur 0m,65.

Prix : le volume broché et la carte en feuille . . . . . 2 fr. 25

Le volume solidement relié et la carte montée sur toile, pliée et reliée comme le volume. 5 fr.

Rivières et canaux.

Navigation intérieure. Rivières et canaux, par GUILLEMAIN, inspecteur général des Ponts et Chaussées, professeur à l'Ecole des Ponts et Chaussées. 2 volumes grand in-8°, avec gravures dans le texte . . . . . 40 fr.

Réservoirs.

N. B. — Les études suivantes ont paru dans les *Annales de la Construction* et se vendent avec la livraison qui les renferme au prix de 2 fr. la livraison.

Les réservoirs d'alimentation d'eau de la Ville de Paris, à Montmartre, avec 2 planches. Livraison de février 1890 . . . . . 2 fr.

Réservoir métallique de 200 mètres cubes du service des eaux de Paris, avec une planche. Livraison de septembre 1890 . . . . . 2 fr.

Réservoir de Torcy-Neuf, pour l'alimentation du canal du Centre, avec 2 planches. Livraison d'avril 1891 . . . . . 2 fr.

Réservoirs à pétrole des docks de Saint-Ouen, avec une planche. Livraison de juin 1877. 2 fr.

Réservoir de la Ville de Norwood (Ohio). Livraison de mars 1895. . . . . 2 fr.

Réservoir en maçonnerie de 8 000 mètres de capacité, sur le plateau d'Avron, avec une planche. Livraison de janvier 1892 . . . . . 2 fr.

Réservoir d'eau à l'hospice Ferrari, à Clamart, avec une planche. Livraison de mars 1893. 2 fr.

Prise d'eau du réservoir de Montaubry (canal du Centre), avec 1 planche. Livraison de juillet 1893 . . . . . 2 fr.

Tour hydraulique pour l'alimentation d'eau de la gare de Brême ; avec une planche. Livraison d'octobre 1893 . . . . . 2 fr.

Note sur le calcul des fonds de réservoirs soutenus au pourtour et au centre. Livraison de janvier 1894 . . . . . 2 fr.

Barrages-réservoirs.

Étude théorique et pratique sur les barrages-réservoirs. Barrages en terre, barrages mixtes barrages en maçonnerie, rupture des barrages-réservoirs, par A. Dumas, ingénieur des Arts et manufactures. 1 volume grand in-8°, avec 107 figures dans le texe. . . . . 7 fr. 50

Moyens de franchir les chutes des canaux.

Étude sur les moyens de franchir les chutes des canaux. Écluses, plans inclinés, ascenseurs, ascenseur des Fontinettes, par H. GAUSON, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées et L.-A. BARRET ingénieur en chef de l'usine Cail. 1 volume grand in-8°, et 1 atlas in-4°, de 28 planches. . . 25 fr.

Travaux maritimes.

Travaux maritimes ; phénomènes marins ; accès des ports. Mouvements de la mer. — Régime des côtes. — Matériaux dans l'eau de mer. — Atterrage. Entrée des ports. Jetées, par LAROCHE, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, professeur à l'Ecole des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8 et 1 atlas in-4° de 46 planches doubles . . . . . 40 fr.

Ports maritimes.

Ports maritimes. Ports d'échouage. — Bassins à flot. — Ecluses des bassins à flot. — Portes d'écluses. — Ponts mobiles. — Moyens d'obtenir et d'entretenir la profondeur à l'entrée des ports. — Moyen d'obtenir et d'entretenir la profondeur dans les ports. Ouvrages et appareils pour la répation des navires. Défense des côtes. Eclairage et balisage des côtes. Exploitation des ports. Canaux maritimes, par F. LAROCHE, inspecteur général des Ponts et Chaussées, professeur à l'École nationale des Ponts et Chaussées. 2 volumes grand in-8°, avec figures dans le texte, et 2 atlas in-4° contenant 37 planches doubles . . . . . 50 fr.

Cours de ponts.

Cours de ponts de l'Ecole des Ponts et Chaussées. Emplacements, débouchés, fondations, ponts en maçonnerie par JEAN RÉSAL, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées. 1 vol. gr. in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte. . . . . 14 fr.

Ponts en maçonnerie.

Ponts en maçonnerie, par E. DEGRAND, inspecteur général des Ponts et Chaussées, et J. RÉSAL, ingénieur des Ponts et Chaussées. 2 volume grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte. . . . . 40 fr.

Barême des poutres métalliques.

Barême des poutres métalliques à âmes pleines et à treillis, par PASCAL, ingénieur civil. 1 volume in-4°, avec figures dans le texte. Relié. . . . . 12 fr. 50

Constructions métalliques.

Constructions métalliques. — Elasticité et résistance des matériaux : fonte, fer et acier, par JEAN RÉSAL, ingénieur des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte. 20 fr.